

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO EFEITO DE ADIÇÕES NA AUTORREGENERAÇÃO DE ARGAMASSAS DE CIMENTO

Melissa Orlanda Vivas de Oliveira

**Mestrado em Engenharia Civil
Área de Especialização: Construção
Dissertação**

ORIENTADOR(ES): Professora Cristiana Nadir Gonilho Pereira
Professora Doutora Maria Paulina Santos Forte de Faria Rodrigues

Dezembro de 2018

Dissertação submetida no Instituto Politécnico de Setúbal

Avaliação experimental do efeito de adições na autorregeneração de argamassas de cimento

Mestrado em Engenharia Civil

DECLARAÇÃO DE AUTORIA DO TRABALHO

Declaro ser o autor deste trabalho, que é original e inédito. Autores e trabalhos consultados estão devidamente citados no texto e constam da listagem de referências incluída.

Melissa Orlanda Vivas de Oliveira

(assinatura)

DIREITOS DE COPIA OU COPYRIGHT

© **Copyright:** Melissa Orlanda Vivas de Oliveira

O Instituto Politécnico de Setúbal tem o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicitar este trabalho através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, de o divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

A minha mãe e à memória do meu pai

Nada se obtém sem esforço, tudo se pode conseguir com ele

Ralph Emerson

AGRADECIMENTOS

Apesar da presente dissertação se apresentar como uma avaliação de carácter individual, o seu desenvolvimento não seria possível sem o apoio e disponibilidade das pessoas que, de alguma maneira, intervieram ao longo deste processo.

Gostaria de começar por agradecer à Professora Cristiana Pereira, a minha orientadora científica, pela oportunidade de desenvolver este tema desafiante e pelo tempo dispensado em prol do mesmo. Quero também agradecer por todo o apoio, que fez com que nunca me sentisse desamparada. Retiro desta experiência todos os conhecimentos que amavelmente me transmitiu. O seu entusiasmo e positivismo foram cruciais ao longo de todo este processo.

À minha coorientadora científica, a Professora Doutora Paulina Faria Rodrigues, quero agradecer por toda a ajuda facultada e por todos os conhecimentos transmitidos. Pela disponibilidade, incentivo e partilha de conhecimento. Quero também agradecer pela cinza volante que tão prontamente disponibilizou para usar na produção das argamassas.

Ao Sr. Alexandre Gamito, técnico do Laboratório de Engenharia Civil da ESTBarreiro/IPS, agradeço a disponibilidade, a partilha de conhecimentos e todo o auxílio prestado ao longo da fase experimental do trabalho.

A nível institucional, agradeço à ESTBarreiro/IPS, pela disponibilização de equipamentos e materiais que permitiram os desenvolvimentos da parte laboratorial da dissertação.

À minha mãe, quero agradecer pela confiança depositada em mim e pela força que me deu ao longo deste desafio, bem como todo o apoio nos momentos mais desgastantes deste trabalho. Agradeço a sua compreensão pelos momentos em que não pude estar presente. Pelos momentos descontraídos com o intuito de desanuviar e recarregar energias. Quero agradecer também ao meu pai que, apesar de já não estar presente, me incutiu, desde cedo, que o esforço vale sempre a pena se o objetivo é o de alcançar os nossos objetivos.

Por último, quero agradecer ao meu namorado, Filipe, por toda a ajuda, quer no laboratório, quer a segurar as pontas de tudo o resto, em prol deste desafio. Pela força que me deu e por nunca me ter deixado desamparada quando eu mais precisei.

RESUMO

A pertinência do tema da autorregeneração está no crescente interesse, em medidas preventivas, associadas à durabilidade dos revestimentos dos edifícios. Idealmente, um revestimento com capacidade autorregenerante terá um maior tempo de vida útil, minimizando os inconvenientes e dispendiosas intervenções que estes requerem. Posto isto, na presente dissertação, é feita uma avaliação experimental do efeito de adições na autorregeneração de argamassas cimentícias, nomeadamente a cinza volante e o fíler calcário.

A campanha laboratorial incidiu na produção de 5 tipo de argamassa: de cimento (como referência), com substituição parcial de cimento por fíler calcário (com 15% e 30%) e com substituição de cimento por cinza volante (com 15% e 30%). Para cada tipo de argamassa sujeitou-se metade dos provetes a um dano, ou seja, aplicou-se uma carga à compressão, de cerca de 60% da carga de rotura (carga máxima sem que ocorra a desintegração do provete), com o intuito de avaliar o seu desenvolvimento em termos de eventual autorregeneração ao fim de 120 dias. Foi feito um conjunto de ensaios aos 28 e aos 120 dias, tanto no estado fresco como no estado endurecido. No estado fresco ensaiou-se a consistência por espalhamento, massa volúmica aparente e o teor de ar. No estado endurecido determinou-se a resistência à compressão, a resistência à tração por flexão, a porosidade aberta e calcularam-se as massas volúmicas. Fez-se, também, o ensaio da absorção de água de capilaridade, obtendo-se o coeficiente de capilaridade e o valor assintótico. Para além dos ensaios ditos tradicionais fez-se, também, uma monitorização da velocidade de propagação dos ultrassons (a cada 15 dias) com o intuito de observar um possível desenvolvimento da estrutura interna das argamassas, associado à autorregeneração e, calculando também, o módulo de elasticidade dinâmico.

Os resultados decorrentes dos ensaios laboratoriais não permitiram concluir que o dano provocado tenha sido efetivo, no entanto, foi possível observar que, na maioria dos ensaios, os provetes danificados não conseguiram atingir os mesmos resultados obtidos para os provetes não danificados. Não obstante, foi possível observar que a substituição parcial de cimento por 15% de fíler calcário e por 30% de cinza volante apresenta diversas vantagens das quais se destacam, um melhor arranjo do esqueleto sólido da argamassa acompanhado por um menor teor de ar na mistura (no estado fresco). Ao mesmo tempo, obtém-se menores porosidades, velocidades de absorção capilar e absorção total de água por capilaridade.

PALAVRAS-CHAVE: Autorregeneração, argamassa, cimento, fíler calcário, cinza volante.

ABSTRACT

The relevance of the self-healing theme lies in the growing interest in preventive measures associated with the durability of building coatings. Ideally, a self-healing coating will have a longer shelf life, minimizing the drawbacks and costly interventions that these require. Thus, in the present dissertation, an experimental evaluation of the effect of additions on the self-healing of cement mortars, namely fly ash, and the limestone filler is studied.

The laboratory campaign focused on the production of 5 types of mortar: cement (as a reference), partial replacement of cement by limestone filler (15% and 30%) and replacement of cement by fly ash (15% and 30%). For each type of mortar, half of the test pieces were subjected to a damage, i.e. a compressive load of about 60% of the breaking load (maximum load without disintegration of the test piece) was applied, in order to evaluate its development in terms of possible self-healing after 120 days. A set of tests were performed at 28 and 120 days, both fresh and in the hardened state. In the fresh state the consistency, bulk density and air content were tested. In the hardened state, the compressive strength, the flexural tensile strength, the open porosity was determined, and the densities were calculated. The capillary water absorption test was also performed, obtaining the capillary coefficient and the asymptotic value. In addition to the traditional tests, ultrasonic propagation velocity was monitored (every 15 days) in order to observe a possible development of the internal structure, associated with self-healing, and the dynamic elasticity was calculated.

The results of the laboratory tests did not allow to conclude that the damage caused was effective, however, it was possible to observe that, in most of the tests, the damaged specimens were not able to reach the same results obtained for the undamaged specimens. Nevertheless, it was possible to observe that the partial substitution of cement by 15% of limestone filler and by 30% of fly ash has several advantages, of which a better arrangement of the solid skeleton of the mortar accompanied by a lower content of air in the mixture (in the fresh state). At the same time, lower porosities, capillary absorption rates and total water absorption by capillarity are obtained.

KEYWORDS: Self-healing, mortar, cement, limestone filler, fly ash.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
1.INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO E JUSTIFICAÇÃO DO TEMA	1
1.2. OBJETIVOS E METODOLOGIA	2
1.3. ESTRUTURA E ORGANIZAÇÃO DO DISSERTAÇÃO	2
2.ARGAMASSAS	3
2.1. DEFINIÇÕES E CONCEITOS	3
2.2. ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO	7
2.2.1. LIGANTES	15
2.2.2. AGREGADOS	15
2.2.3. ÁGUA	26
2.2.4. ADIÇÕES.....	26
2.2.4.1. CINZA VOLANTE	28
2.2.4.2. FÍLER CALCÁRIO	30

3. AUTORREGENERAÇÃO	33
3.1. INTRODUÇÃO	33
3.2. DEFINIÇÕES E CONCEITOS	37
3.3. MECANISMOS DE AUTORREGENERAÇÃO	40
3.3.1. REGENERAÇÃO NATURAL OU AUTÓGENA	41
3.3.2. REGENERAÇÃO AUTÓNOMA OU ATIVADA	43
3.4. ADIÇÕES	44
3.4.1. CINZA VOLANTE	45
3.4.2. FÍLER CALCÁRIO	46
3.5. AVALIAÇÃO DO EFEITO DE AUTORREGENERAÇÃO	47
 4. CAMPANHA LABORATORIAL	 51
4.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS	51
4.2. DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS	52
4.2.1. CIMENTO PORTLAND	52
4.2.2. AGREGADO	54
4.2.3. FÍLER CALCÁRIO	56
4.2.4. CINZA VOLANTE	57
4.3. COMPOSIÇÕES ESTUDADAS	58
4.4. PRODUÇÃO DAS ARGAMASSAS	60
4.5. PLANO DE ENSAIOS	62
4.6. CARACTERIZAÇÃO NO ESTADO FRESCO	64
4.6.1. CONSISTÊNCIA POR ESPALHAMENTO	64
4.6.2. MASSA VOLÚMICA APARENTE	65
4.6.3. TEOR DE AR	66
4.7. PREPARAÇÃO DE PROVETES DE ARGAMASSA NO REVESTIMENTO DE TIJOLO	66

4.8. MOLDAGEM, DESMOLDAGEM E CURA DOS PROVETES PRISMÁTICOS	67
4.9. DANIFICAÇÃO DOS PROVETES.....	69
4.10. CARACTERIZAÇÃO NO ESTADO ENDURECIDO	71
4.10.1. OBSERVAÇÃO DA RETRAÇÃO NO MOLDE.....	71
4.10.2. VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ULTRASSONS E MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO	72
4.10.3. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR FLEXÃO.....	74
4.10.4. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	74
4.10.5. POROSIDADE ABERTA E MASSAS VOLÚMICAS.....	75
4.10.6. ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE.....	76
4.10.7. ADERÊNCIA POR ARRANCAMENTO – ENSAIO DE ARRANCAMENTO POR TRAÇÃO “PULL-OFF” E OBSERVAÇÃO DE FISSURAÇÃO NOS TIJOLOS	78
 5.APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	 81
5.1. INTRODUÇÃO	81
5.2. RESULTADOS REFERENTES À CARACTERIZAÇÃO NO ESTADO FRESCO.....	83
5.2.1. CONSISTÊNCIA POR ESPALHAMENTO	83
5.2.2. MASSA VOLÚMICA APARENTE	84
5.2.3. TEOR DE AR	86
5.3. RESULTADOS REFERENTES À CARACTERIZAÇÃO NO ESTADO ENDURECIDO	87
5.3.1. OBSERVAÇÃO DA RETRAÇÃO NO MOLDE.....	87
5.3.2. VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ULTRASSONS E MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO	87
5.3.3. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR FLEXÃO.....	96
5.3.4. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	99
5.3.5. POROSIDADE ABERTA E MASSAS VOLÚMICAS.....	102
5.3.6. ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE.....	112

5.3.7.	ADERÊNCIA POR ARRANCAMENTO – ENSAIO DE ARRANCAMENTO POR TRAÇÃO “ <i>PULL-OFF</i> ” E OBSERVAÇÃO DE FISSURAÇÃO NOS TIJOLOS	123
--------	---	-----

6.ANÁLISE DOS RESULTADOS 127

6.1.	INFLUÊNCIA DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE CIMENTO POR FÍLER CALCÁRIO	128
------	--	-----

6.2.	INFLUÊNCIA DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE CIMENTO POR CINZA VOLANTE	135
------	---	-----

7.CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS . 145

7.1.	CONCLUSÕES GERAIS.....	145
------	------------------------	-----

7.1.1.	SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO	145
--------	---------------------------------------	-----

7.2.	PROPOSTAS DE DESENVOLVIMENTO FUTURO	148
------	---	-----

8.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 149

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Cronograma histórico das argamassas (Fonte: APFAC)	4
Figura 2 – Distribuição percentual por tipos de argamassas secas produzidas em Portugal, no ano 2014 - Adaptado de: [7].....	8
Figura 3 – Requisitos para argamassas de revestimento.....	9
Figura 4 – Anomalias em reboco	11
Figura 5 - Diagrama do processo de produção do cimento por via seca - Adaptado de: [16] ...	16
Figura 6 - Imagem esquemática da superfície do clínquer obtida por microscópio ótico (x100) [21]	17
Figura 7 - Esquema da evolução do fluxo de calor na hidratação do cimento - Adaptado de: [25]	20
Figura 8 - Contribuição das pozolanas na reação de hidratação do cimento.....	24
Figura 9 - Imagens da análise por SEM de cinza volante, foto ampliada a) 500x e b) 2000x [18]	28
Figura 10 – Resistência à compressão de uma argamassa de cimento, com traço 1:3 com substituição parcial de cimento por cinza volante – Adaptado de: [41]	29
Figura 11 - Influência do traço e substituição parcial do cimento por cinza volante na resistência à compressão de uma argamassa de cimento - Adaptado de: [41]	30
Figura 12 - Fíler calcário, foto ampliada 63 vezes (a) e 60 vezes (b) [45]	31
Figura 13 - Processo de cofragem dos canais de irrigação no Equador: (a) preparação da solução; (b) preparação da cofragem; (c) secções do canal, uma com o betão autorregenerante e outra com betão de controlo [52].....	34
Figura 14 - Localização de aplicação do sistema de reparação à base de bactérias: (a) fissuras observadas no pavimento; (b) danos no pavimento por exposição à ação gelo/degelo [53]	35
Figura 15 - Fissura na estação de tratamento de água antes da reparação: (a), (b) e (c) após a reparação com argamassa autorregenerante e com argamassa convencional [52].....	36

Figura 16 - Reparação das microfissuras nas paredes de diafragma no Groninger Forum [54]	36
Figura 17 - Diagrama de Venn com a definição de autorregeneração no betão - Adaptado de: [55].....	38
Figura 18 - Principais mecanismos associados à autorregeneração autógena em materiais cimentícios – Adaptado de: [51]	42
Figura 19 – Cimento Portland CEM II/B-L 32,5 N	53
Figura 20 – Areia fina 0/2	54
Figura 21 – Areia grossa 0/4	55
Figura 22 - Curva granulométrica das areias e da mistura de areias [36]	55
Figura 23 – Fíler calcário.....	56
Figura 24 – Cinza volante	57
Figura 25 - Produção da argamassa: a) pesagem da matéria-prima; b) homogeneização da matéria-prima a seco e manualmente; c) misturadora mecânica utilizada no procedimento; d) raspagem do material acumulado no fundo da cuba.	61
Figura 26 – Esquematização dos provetes elaborados e ensaiados para cada tipo de argamassa	63
Figura 27 - Ensaio de consistência por espalhamento: a) dispositivo de ensaio; b) preparação do molde; c) medição do espalhamento	65
Figura 28 - Ensaio do teor de ar na argamassa no estado fresco: a) aparelho medidor de ar; b) criação de pressão no recipiente; c) leitura do teor de ar na argamassa	66
Figura 29 - Aplicação do revestimento: a) simulação de aplicação em obra; b) remoção do excesso de argamassa; c) remoção da cofragem	67
Figura 30 – Moldagem dos provetes: a) fixação do molde à mesa de compactação b) enchimento do molde; c) molde com o excesso de argamassa rasado após compactação	68
Figura 31 - Cura dos provetes: a) provetes após desmoldagem e devidamente identificados; b) condições de cura dos provetes.....	69
Figura 32 - Danificação dos provetes - Método de aplicação de carga.....	70
Figura 33 - Proвете após aplicação de carga de 60% do valor à rotura.....	70
Figura 34 - Proвете após aplicação de carga superior a 60% do valor à rotura.....	70

Figura 35 - Esquema de utilização dos provetes	71
Figura 36 - Inspeção visual de retração longitudinal de um dos provetes no respetivo molde ..	72
Figura 37 - Ensaio de medição da velocidade de ultrassons através do método: a) direto; b) semidirecto; c) indireto – Adaptado de: [96].....	72
Figura 38 – Leitura da velocidade de ultrassons: a) introdução da dimensão do provete no equipamento; b) marcação dos pontos de leitura no provete; c) posicionamento dos transdutores e leitura	73
Figura 39 - Procedimento do ensaio da resistência à tração por flexão: a) introdução dos dados no equipamento; b) posicionamento do provete; c) rotura do provete	74
Figura 40 - Procedimento do ensaio da resistência à compressão: a) introdução dos dados no equipamento; b) posicionamento do provete; c) rotura do provete	75
Figura 41 - Ensaio de avaliação da porosidade: a) colocação dos topos dos provetes no exsiccador; b) introdução de água no exsiccador; c) pesagem hidrostática	76
Figura 42 - Ensaio de absorção de água por capilaridade: a) sistema usado para simular um ambiente saturado; b) absorção de água pelos provetes	77
Figura 43 – Equipamento usado no ensaio de aderência por arrancamento	79
Figura 44 – Pastilhas utilizadas no ensaio de aderência por arrancamento	79
Figura 45 – Posicionamento do equipamento do ensaio de aderência por arrancamento	80
Figura 46 – Espalhamento médio da pasta cimentícia das amassaduras efetuadas.....	83
Figura 47 – Valores médios da massa volúmica no estado fresco das amassaduras efetuadas	85
Figura 48 - Observação de retração nos provetes da argamassa REF (a) e da argamassa CV30 (b) imediatamente antes da desmoldagem dos mesmos	87
Figura 49 – Valor médio da velocidade de propagação de ultrassons dos provetes com fíler calcário, danificados e não danificados, aos 28 e aos 120 dias	89
Figura 50 - Valor médio da velocidade de propagação de ultrassons dos provetes com cinza volante, danificados e não danificados, aos 28 e aos 120 dias.....	90
Figura 51 - Valor médio do módulo de elasticidade dos provetes com fíler calcário, danificados e não danificados, aos 28 e aos 120 dias	92

Figura 52 - Valor médio do módulo de elasticidade dos provetes com cinza volante, danificados e não danificados, aos 28 e aos 120 dias	93
Figura 53 - Monitorização do valor médio da velocidade de propagação dos ultrassons nos provetes húmidos, com fíler calcário, danificados e não danificados	94
Figura 54 - Monitorização do valor médio da velocidade de propagação dos ultrassons nos provetes húmidos, com cinza volante, danificados e não danificados	95
Figura 55 – Valores médios da resistência à tração por flexão dos provetes com fíler calcário, danificados e não danificados, aos 28 e aos 120 dias	97
Figura 56 - Resistência à tração por flexão dos provetes com cinza volante, danificados e não danificados, aos 28 e aos 120 dias	98
Figura 57 – Valores médios da resistência à compressão dos provetes com fíler calcário, danificados e não danificados, aos 28 e aos 120 dias	100
Figura 58 – Valores médios da resistência à compressão, dos provetes com cinza volante, danificados e não danificados, aos 28 e aos 120 dias	101
Figura 59 - Porosidade aberta dos provetes com fíler calcário, danificados e não danificados, aos 28 e aos 120 dias	103
Figura 60 - Porosidade aberta dos provetes com cinza volante, danificados e não danificados, aos 28 e aos 120 dias	105
Figura 61 - Valores médios da massa volúmica aparente dos provetes com fíler calcário, danificados e não danificados, aos 28 e aos 120 dias	107
Figura 62 - Valores médios da massa volúmica aparente dos provetes com cinza volante, danificados e não danificados, aos 28 e aos 120 dias	108
Figura 63 - Valores médios da massa volúmica específica dos provetes com fíler calcário, danificados e não danificados, aos 28 e aos 120 dias	110
Figura 64 - Valores médios da massa volúmica específica dos provetes com cinza volante, danificados e não danificados, aos 28 e aos 120 dias	111
Figura 65 - Absorção de água por capilaridade, dos provetes com fíler calcário, aos 28 dias	112
Figura 66 - Absorção de água por capilaridade, dos provetes com fíler calcário, aos 28 dias (30 minutos iniciais)	113
Figura 67 - Absorção de água por capilaridade, dos provetes com fíler calcário, aos 120 dias	113

Figura 68 - Absorção de água por capilaridade, dos provetes com fíler calcário, aos 120 dias (30 minutos iniciais)	114
Figura 69 - Absorção de água por capilaridade, dos provetes com cinza volante, aos 28 dias	114
Figura 70 - Absorção de água por capilaridade, dos provetes com cinza volante, aos 28 dias (30 minutos iniciais)	115
Figura 71 - Absorção de água por capilaridade, dos provetes com cinza volante, aos 120 dias	115
Figura 72 - Absorção de água por capilaridade, dos provetes com cinza volante, aos 120 dias (30 minutos iniciais)	116
Figura 73 - Coeficiente de capilaridade dos provetes com fíler calcário, danificados e não danificados, aos 28 e aos 120 dias	118
Figura 74 - Coeficiente de capilaridade dos provetes com cinza volante, danificados e não danificados, aos 28 e aos 120 dias	119
Figura 75 - Valor assintótico dos provetes com fíler calcário, danificados e não danificados, aos 28 e aos 120 dias	121
Figura 76 - Valor assintótico dos provetes com cinza volante, danificados e não danificados, aos 28 e aos 120 dias	122
Figura 77 – Tipos de rotura a observar no ensaio de aderência por arrancamento – Adaptado de: [102]	123
Figura 78 – Tipos de rotura observados no ensaio de aderência por arrancamento: a) Tipo A; b) Tipo B e c) Tipo E	125
Figura 79 - Comparação entre a relação água/ligante e o teor de ar, aos 28 dias e aos 120 dias de idade, entre a argamassa REF, FC15 e FC30	129
Figura 80 – Comparação da massa volúmica aparente com a porosidade aberta, aos 28 dias e aos 120 dias de idade, entre a argamassa REF, FC15 e FC30	130
Figura 81 - Comparação da porosidade aberta com a resistência à tração por flexão e à compressão, aos 28 dias e aos 120 dias de idade, entre a argamassa REF, FC15 e FC30 ...	131
Figura 82 - Comparação do módulo de elasticidade dinâmico com a resistência à tração por flexão e à compressão, aos 28 dias e aos 120 dias de idade, entre a argamassa REF, FC15 e FC30	132

Figura 83 – Comparação entre a porosidade aberta, valor assintótico e coeficiente de capilaridade, aos 28 dias e aos 120 dias de idade, entre a argamassa REF, FC15 e FC30 ...	133
Figura 84 – Análise da monitorização da velocidade de propagação dos ultrassons nas argamassas REF, FC15 e FC30	134
Figura 85 - Comparação entre a relação água/ligante e o teor de ar, aos 28 dias e aos 120 dias de idade, entre a argamassa REF, CV15 e CV30	136
Figura 86 - Comparação da massa volúmica aparente com a porosidade aberta	137
Figura 87 - Comparação da porosidade aberta com a resistência à tração por flexão e à compressão	138
Figura 88 - Comparação do módulo de elasticidade dinâmico com a resistência à tração por flexão e à compressão	140
Figura 89 – Comparação entre a porosidade aberta, valor assintótico e coeficiente de capilaridade	141
Figura 90 - Análise da monitorização da velocidade de propagação dos ultrassons nas argamassas REF, CV15 e CV30.....	142

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Tabela resumo da classificação de argamassas [5].....	6
Tabela 2 - Produção de argamassas em Portugal – 2014 [7]	7
Tabela 3 – Exemplos de fendilhação em revestimentos exteriores [8].....	14
Tabela 4 - Classificação dos materiais ligantes usados em obras de engenharia, de acordo com a sua afinidade para a água [16].....	15
Tabela 5 - Composição química geral dos cimentos [19]	16
Tabela 6 - Composição do clínquer do cimento de Portland (CEM I) - Adaptado de: [20] e [22]	18
Tabela 7 - Resumo das cinco etapas do processo de hidratação do cimento – Adaptado de: [27] e [28].....	21
Tabela 8 - Definição de betão autorregenerante com base na ação e processo definidos pela RILEM-TC221 - Adaptado de: [51].....	39
Tabela 9 - Definição de betão autorregenerante com base na ação e processo pelo RILEM-TC221 - Adaptado de: [51]	39
Tabela 10 - Exemplos de mecanismos para cada processo de autorregeneração - Adaptado de [55], [51] e [1].....	41
Tabela 11 – Propriedades físicas do cimento Portland – CEM II/B-L 32,5 [82].....	53
Tabela 12 - Propriedades químicas do cimento Portland – CEM II/B-L 32,5 [82]	53
Tabela 13 - Propriedades mecânicas do cimento Portland – CEM II/B-L 32,5 [82]	53
Tabela 14 - Massa volúmica e baridade dos agregados utilizados [36]	56
Tabela 15 - Desempenho declarado do fíler calcário [85]	57
Tabela 16 – Propriedades da cinza volante obtida em laboratório – Adaptado de: [18]	58
Tabela 17 - Análise química da cinza volante – Adaptado de: [18]	58
Tabela 18 - Dosagem total dos componentes para cada argamassa produzida	59

Tabela 19 - Traços em massa e em volume para cada uma das argamassas produzidas	59
Tabela 20 - Traços em massa e em volume para cada uma das argamassas produzidas, considerando como ligante o conjunto cimento e material substituinte	60
Tabela 21 - Síntese dos ensaios realizados e respectivas normas.....	62
Tabela 22 - Planificação dos ensaios laboratoriais.....	63
Tabela 23 - Impacto dos resultados obtidos individualmente em relação à média, para resultados da ordem de grandeza dos milhares [21].....	82
Tabela 24 - Impacto dos resultados obtidos individualmente em relação à média, para resultados da ordem de grandeza das centenas, dezenas e unidades [21]	82
Tabela 25 – Espalhamento médio da pasta cimentícia das amassaduras efetuadas.....	83
Tabela 26 – Valores médios da massa volúmica no estado fresco das amassaduras efetuadas	85
Tabela 27 - Valores obtidos para o teor de ar no estado fresco das amassaduras efetuadas ..	86
Tabela 28 – Valor médio da velocidade de propagação de ultrassons dos provetes danificados e não danificados, aos 28 e aos 120 dias.....	88
Tabela 29 – Valor médio do módulo de elasticidade dos provetes danificados e não danificados, aos 28 e aos 120 dias	91
Tabela 30 – Valores médios da resistência à tração por flexão, desvio padrão e coeficiente de variação, aos 28 e aos 120 dias.....	96
Tabela 31 - Valores médios da resistência à compressão, desvio padrão e coeficiente de variação, aos 28 e aos 120 dias.....	99
Tabela 32 - Porosidade aberta dos provetes danificados e não danificados, aos 28 e aos 120 dias	103
Tabela 33 - Valores médios da massa volúmica aparente dos provetes danificados e não danificados, aos 28 e aos 120 dias	106
Tabela 34 - Valores médios da massa volúmica específica dos provetes danificados e não danificados, aos 28 e aos 120 dias	109
Tabela 35 - Coeficiente de capilaridade dos provetes danificados e não danificados, aos 28 e aos 120 dias	117

Tabela 36 - Valor assintótico dos provetes danificados e não danificados, aos 28 e aos 120 dias	120
---	-----

Tabela 37 – Tensão de aderência e tipo de rotura obtidos, aos 28 e aos 120 dias	124
---	-----

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

$\text{Al}_2\text{O}_3(\text{A})$	–	Alumina
C_2S	–	Silicato bicálcico (Belite)
C_3A	–	Aluminato tricálcico (Celite)
C_3S	–	Silicato tricálcico (Alite)
C_4AF	–	Ferroaluminato tetracálcico (Ferrite)
Ca^{2+}	–	Cálcio
$\text{CaO}(\text{C})$	–	Óxido de cálcio/cal
$\text{Ca}(\text{OH})_2$		Hidróxido de cálcio
CH	–	Hidróxido de cálcio ou Portlandite
C-S-H	–	<i>Calcium silicate hydrate</i> (Gel de silicato de cálcio hidratado)
$\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{F})$	–	Óxidos de ferro
H	–	Hidrogénio
H_2O	–	Água
K_2O	–	Óxido de potássio
MgO	–	Óxido de magnésio (Óxido de sódio e Óxido de potássio)
Na_2O	–	Óxido de sódio
$\text{SiO}_2(\text{S})$	–	Sílica
SO_4^{2-}	–	Sulfato
μm	–	Micrómetro

A/L	–	Razão água-ligante
APFAC	–	Associação Portuguesa dos Fabricantes de Argamassas de Construção
CEM	–	Cimento Portland
EN	–	<i>European Norm</i> (Norma Europeia)
ETICS	–	<i>External Thermal Insulating Composite Systems</i> (Sistemas compostos de isolamento térmico pelo exterior)
HR	–	Humidade Relativa [%]
INE	–	Instituto Nacional de Estatística
IPS	–	Instituto Politécnico de Setúbal
JCI	–	<i>Japan Concrete Institute</i> (Instituto de Betão do Japão)
L	–	<i>Limestone</i> (Calcário)
LNEC	–	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
M4L	–	<i>Materials for Life</i> (Materiais para a vida)
NP	–	Norma Portuguesa
pH	–	Escala numérica utilizada para especificar a acidez ou basicidade de uma solução aquosa.
RILEM	–	<i>Reunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux</i>
SARCOS	–	<i>Self-healing as preventive repair of concrete structures</i> (Auto-regeneração como reparação preventiva de estruturas de betão)

1. INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO E JUSTIFICAÇÃO DO TEMA

As zonas urbanas atuais encontram-se, por vezes, repletas de edifícios degradados e alguns até em ruínas, prejudicando assim a atratividade do meio em que se inserem. Chegam por vezes a gerar uma ideia de insegurança e desconforto. Muitos dos edifícios existentes são revestidos por sistemas de argamassa. É possível constatar que as argamassas de reboco afetam profundamente o aspeto, para além do conforto interior (e até mesmo o consumo energético) dos edifícios. Funcionando como a “pele” de um edifício, a argamassa de reboco tem um elevado impacto no desempenho de uma edificação, uma vez que a protege contra as ações atmosféricas, agentes agressivos e outros de impactos físicos, mecânicos, químicos ou biológicos.

A suscetibilidade de uma argamassa à fissuração revela, sem qualquer tipo de dúvida, ser de extrema importância para a durabilidade das estruturas ao longo do tempo e face às opções de reparação existentes que para além de inconvenientes, são dispendiosas. Tem-se, assim, verificado um crescente interesse no desenvolvimento de medidas preventivas. É neste contexto que surge o conceito de autorregeneração. Este conceito é, de um modo muito simplificado, a capacidade que um material tem de “regenerar/reparar” as suas fissuras e até recuperar, mesmo que parcialmente, as suas propriedades iniciais.

De uma forma geral é possível distinguir dois tipos de autorregeneração, autógena ou autónoma. Um mecanismo autógeno estimula a autorregeneração através de adições minerais ou cristalinas, polímeros ou superabsorventes. Um mecanismo autónomo promove a autorregeneração através da utilização de elementos como cápsulas, bactérias ou fibras.

O desenvolvimento da capacidade de autorregeneração de um revestimento de argamassa permitirá dificultar, e assim minorar ou até impedir, a penetração de agentes que levem à deterioração da estrutura, aumentando a sua vida útil, e possibilitando a recuperação, mesmo que parcial, das suas propriedades mais importantes. É certo que o aparecimento de pequenas fissuras não causa necessariamente o colapso de uma estrutura, mas efetivamente, acelera a sua degradação, diminui a vida útil e também a sustentabilidade das construções. Este conceito de sustentabilidade, que se tem verificado mais em foco nos últimos tempos, remete para um aumento da consciência no uso de recursos naturais. Desta necessidade surgiu, recentemente, a COST Action CA15202 – *Self- healing as preventive repair of concrete structures* (SARCOS), que reuniu uma comunidade de investigadores europeus ativos neste campo de estudo e apoio financeiro da Comissão Europeia, com o propósito de criar sinergias entre vários investigadores e alavancar os seus esforços para

desenvolver procedimentos e ensaios normalizados, assim como *guidelines* no campo da autorregeneração [1].

1.2. OBJETIVOS E METODOLOGIA

As argamassas de revestimento têm um papel fundamental no controlo da ocorrência de manifestações patológicas em fachadas exteriores. Torna-se, portanto, essencial que uma argamassa cumpra os seus requisitos tanto ao nível da impermeabilização e proteção, como estéticos. Na presente dissertação, a anomalia em análise é a fissuração dos revestimentos dado o seu papel relevante na deterioração dos revestimentos exteriores.

A capacidade de autorregeneração de uma argamassa adquire particular interesse na medida em que, idealmente, permitiria aumentar o tempo de vida útil de um revestimento e minimizar as inconvenientes e dispendiosas intervenções que estes requerem.

Considerando a pertinência de tal possibilidade, a presente dissertação tem como principais objetivos: efetuar uma análise do estado dos conhecimentos relativa à autorregeneração de argamassas; efetuar uma avaliação experimental do efeito de adições de cinza volante e de fíler calcário na autorregeneração de argamassas de cimento.

Tendo em vista o cumprimento deste objetivo produziram-se as seguintes argamassas: uma argamassa de cimento de referência; duas argamassas com substituições parciais de cimento (15% e 30%) por fíler calcário; duas argamassas com substituições parciais de cimento (15% e 30%) por cinza volante. Para cada argamassa elaborada, metade dos provetes foram “danificados” aos 28 dias através da aplicação de uma carga de compressão correspondente a 60% da tensão de rotura à compressão da argamassa. Os provetes foram mantidos em condições de cura com uma humidade relativa próxima de 100% até serem ensaiados tanto aos 28 como aos 120 dias.

Pretendeu-se avaliar a influência do tipo de adição e percentagem de substituição do cimento nas argamassas e a capacidade de recuperação das propriedades aos 120 dias dos provetes previamente danificados. A informação obtida na presente dissertação pretende contribuir para o estudo de argamassas autorregenerantes.

1.3. ESTRUTURA E ORGANIZAÇÃO DO DISSERTAÇÃO

A presente dissertação encontra-se estruturada em 8 capítulos. O estado de arte encontra-se distribuído pelos capítulos 2 e 3 em que o primeiro se foca em argamassas, na sua generalidade, e o segundo no conceito de autorregeneração. No capítulo 4 é feita uma descrição detalhada da campanha laboratorial e no capítulo 5 são apresentados os resultados obtidos. A análise aprofundada dos resultados obtidos é feita no capítulo 6 e no capítulo 7 são expostas as conclusões gerais e as propostas de desenvolvimento futuro.

2. ARGAMASSAS

2.1. DEFINIÇÕES E CONCEITOS

O constante aperfeiçoamento e desenvolvimento dos materiais de construção está diretamente associado a uma melhoria da qualidade de vida do Homem. A criação de abrigo é uma prática existente desde os primórdios da existência humana. A necessidade constante de proteção face aos animais, intempéries e outras condições adversas introduziu a necessidade de usar aquilo que a natureza fornecia, desde a mais básica sobreposição de pedras até aos materiais complexos aos quais se tem acesso nos dias de hoje. Independentemente do avanço tecnológico ao qual se assiste, o aperfeiçoamento e a constante inovação são conceitos imperativos para melhorar os materiais de que se dispõe atualmente e, consequentemente, as condições de habitabilidade.

Alguns autores [2] indicam que as primeiras argamassas conhecidas foram descobertas na Galileia, atual estado de Israel, tendo mais de 10 000 anos de existência. As mais antigas tinham argila como ligante; a maioria das argamassas romanas tinham cal como ligante. No entanto, nas obras públicas, adicionavam ainda material pozolânico, conferindo alguma hidráulica às argamassas de cal, melhorando a sua durabilidade e permitindo construções mais complexas e de maior porte.

Dada a crescente necessidade de construção em zonas fluviais e marítimas, surgiu a necessidade de desenvolver ligantes hidráulicos. O engenheiro John Smeaton, entre 1724 e 1792, foi o responsável pela edificação do quarto farol de Eddystone (Plymouth, Inglaterra) no qual se recorreu ao uso de aglomerantes hidráulicos [2]. Mais tarde, em 1824, Joseph Aspdin patenteou o fabrico do Cimento, que intitulou de Portland devido à semelhança deste com a pedra de construção da Ilha de Portland [2]. Em Portugal, no século XIX, passa a ser usado cimento de Portland na maioria dos rebocos de enchimento, acabamento e como ligante hidráulico das argamassas. Desde então, têm sido introduzidas melhorias nos diferentes produtos, desenvolvidas normas e diretivas, com o intuito de manter um controlo e qualidade em todos os processos associados à elaboração de argamassas. Esta evolução é observada no cronograma histórico da Figura 1.

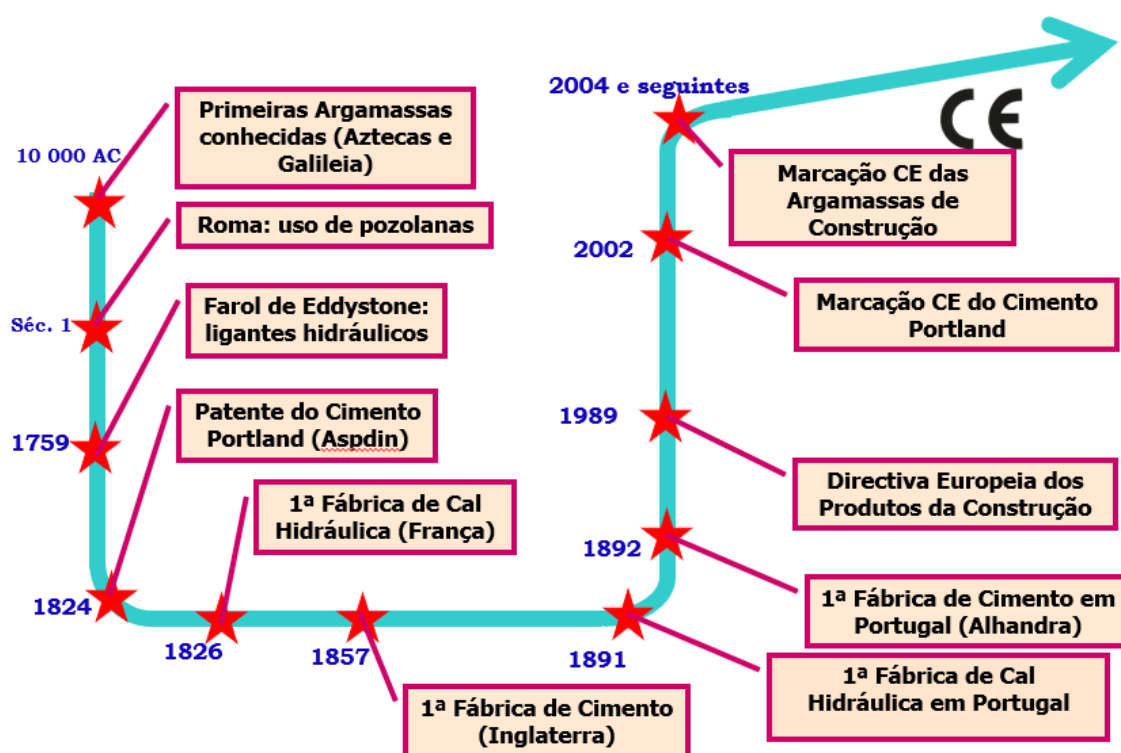


Figura 1 - Cronograma histórico das argamassas (Fonte: APFAC)

Uma argamassa pode ser definida como uma mistura de agregados, geralmente de granulometria inferior a 2-4 milímetros (mais raramente de granulometria inferior a 8 milímetros, quando usada em betonilhas), aglomerados por um ou mais ligantes (orgânicos ou inorgânicos), e por vezes adições e/ou adjuvantes [3].

Existem vários tipos de argamassa e estes podem distinguir-se consoante a sua consistência, produção ou tipo de ligante. Uma vez que a natureza do ligante é o fator que mais influencia o comportamento de uma argamassa, é possível inseri-las nos seguintes grupos: cimentícias, de cal ou bastardas. Estas últimas apresentam mais do que um ligante.

Os agregados vão ter um papel importante na contribuição para a resistência e compacidade da argamassa.

A argamassa ganha coesão através da ligação dos seus agregados à pasta do ligante e, assim, propriedades como a forma dos grãos, a porosidade e a dureza dos grãos, vão influenciar o comportamento global da argamassa.

A inclusão de adições ou adjuvantes nas argamassas (semelhantes aos utilizados no fabrico de betão), permite favorecer determinadas características e anular efeitos indesejáveis no seu comportamento.

Das diversas funções que uma argamassa possui, é possível destacar a função de proteger as superfícies contra intempéries, unir diferentes materiais, providenciar uma superfície de

acabamento lisa ou reparar/renovar uma estrutura. As argamassas possuem um diversificado campo de aplicação, podendo até constituir, por si só, um elemento da construção – rebocos [4]. Das diversas aplicações é possível destacar as seguintes:

- Betonilhas;
- Assentamentos (alvenarias, ladrilhos, azulejos, cantarias, tubagens, entre outros);
- Revestimentos (tetos, paredes e pisos);
- Argamassa armada;
- Acabamentos e remates;
- Tratamento de fissuras e juntas;
- Reparação ou recuperação da estrutura;
- Sistema de ETICS (*External Thermal Insulating Composite Systems*).

Uma argamassa pode ainda ser distinguida conforme o ligante, sendo: uma argamassa de um só ligante e cuja designação vai depender do ligante usado (e. g. a argamassa de cal, a argamassa de cimento, etc.) ou uma argamassa bastarda, quando na sua composição existe mais do que um ligante (e. g. estuque que possui dois ligantes - a cal e o gesso).

As normas EN 998-1:2010 [5] e a EN 998-2:2003 [6] permitem classificar os diferentes tipos de argamassa (de reboco ou de assentamento, respetivamente) tendo em conta três critérios: o seu local de produção, propriedades e utilização e conceção, conforme se observa na Tabela 1.

Tabela 1 - Tabela resumo da classificação de argamassas [5]

Critério de classificação	Tipos de argamassa	Definições
Local de produção	Tradicional	É composta pelos elementos primários como ligantes, agregados e água que são doseados e misturados em obra.
	Industrial (ou fabril)	São doseadas e misturadas em fábrica e chegam à obra em pó (necessitando adição de água) ou em pasta (prontas a aplicar).
	Industrial semiacabada pré-doseada	Os componentes são doseados em fábrica, fornecidos em obra e misturados consoantes a informação do fabricante.
	Industrial semiacabada pré-misturada	Os componentes são doseados e misturados em fábrica, fornecidos em obra e à qual se adicionam outros componentes conforme informação do fabricante.
Propriedades e utilização	Uso geral (GP)	Não possui características especiais, é usada para reboco e, geralmente, complementada com pintura ou argamassa de acabamento/colorida (CR).
	Leve (LW)	Possui massa volúmica endurecida em seco inferior a 1300 kg/m ³ .
	Colorida (CR)	É especialmente colorida e usada para rebocos interiores e exteriores.
	Monocamada (OC)	Aplicada numa só camada, em rebocos exteriores, como alternativa aos sistemas multicamada dado que cumprem as mesmas funções de proteção e decoração.
	Renovação (R)	Usada para rebocos interiores e exteriores, em paredes de alvenaria com humidades contendo sais solúveis em água. Possui elevada porosidade e permeabilidade ao vapor, e reduzida ação capilar.
	Isolamento térmico (T)	Possui propriedades específicas de isolamento térmico.
Conceção	Desempenho	A composição e o processo de fabrico são definidos pelo fabricante e com o intuito de obter propriedades específicas.
	Formulação	A sua composição é pré-determinada e as propriedades obtidas dependem da proporção dos diferentes componentes.

A APFAC (Associação Portuguesa dos Fabricantes de Argamassas de Construção) [7] releva dados (Tabela 2) que permitem constatar que a produção de argamassa em Portugal é bastante significativa.

Tabela 2 - Produção de argamassas em Portugal – 2014 [7]

Número de empresas	Argamassas fabris secas (Prontas a amassar)	Argamassas fabris estabilizadas (Prontas a usar)	Argamassas preparadas em obra (Estaleiro)
Cerca de 30, das quais 18 são associadas da APFAC	454 000 toneladas	16 000 toneladas	Superior a 1 milhão de toneladas

2.2. ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO

Atualmente, as argamassas possuem inúmeras utilizações em contexto de obra, sendo maioritariamente visíveis nos acabamentos e revestimentos dos edifícios. Estas são utilizadas para revestir paredes, tetos, muros, bem como em acabamentos com revestimentos cerâmicos ou até simplesmente pintura.

Em Portugal, verifica-se a predominância de rebocos tradicionais ou marmorites no revestimento exterior das paredes, em cerca de 84% dos edifícios [8]. Na Figura 2 é possível observar que 40% das argamassas secas produzidas em Portugal, no ano 2014, correspondem a argamassas de revestimento, os rebocos.

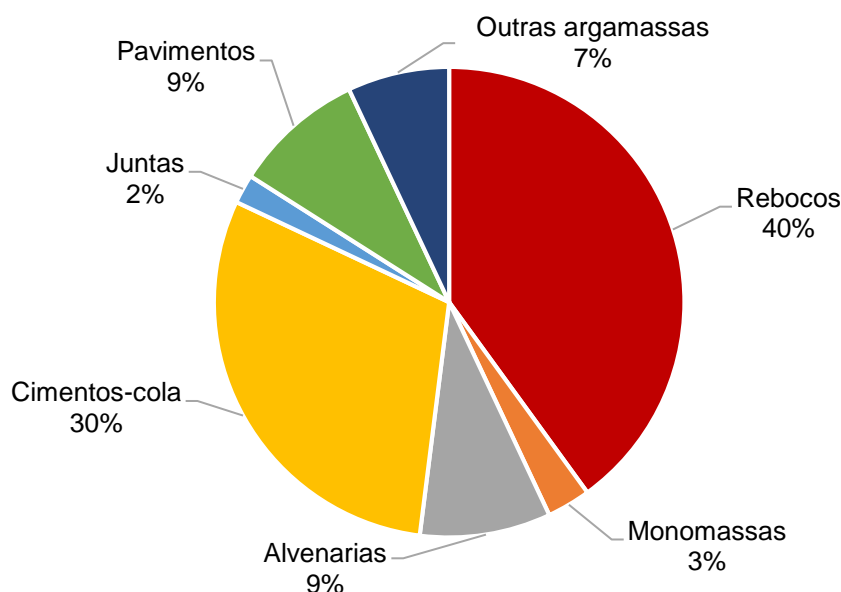


Figura 2 – Distribuição percentual por tipos de argamassas secas produzidas em Portugal, no ano 2014 - Adaptado de: [7]

A argamassa de revestimento constitui, assim, um elemento de elevada importância ao nível da construção, possuindo a função de proteger e melhorar as condições tanto a nível de salubridade, habitabilidade e também a nível estético. Um dos papéis mais relevantes das argamassas de revestimento consiste em proteger as edificações das diferentes ações atmosféricas a que estão permanentemente expostas, agentes agressivos e diversos danos, sejam estes físicos, mecânicos, químicos ou biológicos.

As anomalias ocorrentes em argamassas de revestimentos provêm de diversas causas, desde a escolha de materiais a utilizar, a adequabilidade da natureza da argamassa ao tipo de suporte onde é aplicada, erros de composição ou até de aplicação. Por várias vezes, e geralmente por questões económicas, opta-se por aplicar camadas de argamassa de espessuras insuficientes, originando assim um aumento do risco de surgimento de anomalias, bem como o aumento dos custos de manutenção e reparação consequentes.

O bom desempenho de uma argamassa de revestimento tem, portanto, um elevado impacto no desempenho da edificação funcionando como a “pele” do edifício, protegendo-o. Assim sendo, deve ser feita uma análise cuidada e uma escolha adequada das características a definir para uma argamassa, existindo diferentes requisitos a cumprir. As diferentes técnicas de construção e os materiais aplicados podem implicar diferentes requisitos para as argamassas de revestimento. Analisando o trabalho de diversos autores [9-11], é possível compilar, conforme se observa na Figura 3, os requisitos mais significativos que permitem obter uma argamassa de revestimento com um bom comportamento e que cumpra as funções que lhe são exigidas.

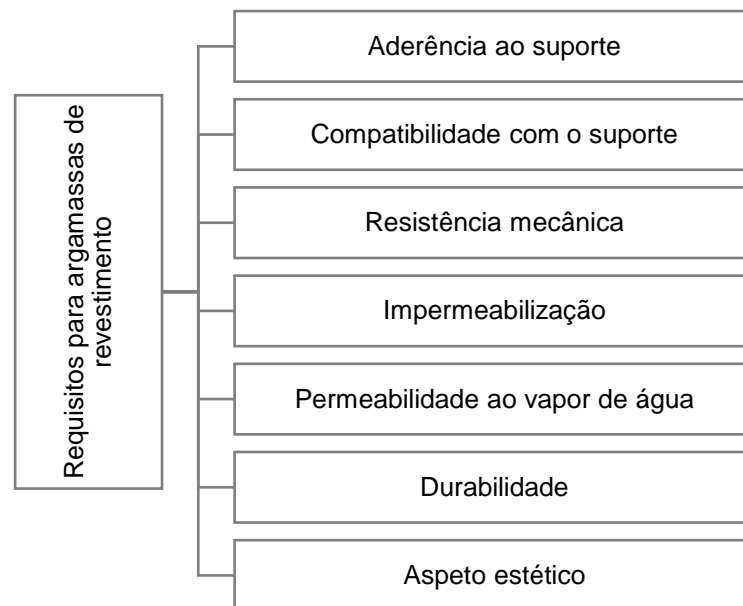


Figura 3 – Requisitos para argamassas de revestimento

Deve ser garantida uma correta aderência entre o suporte e o revestimento, de modo a que este não se descole, garantindo assim uma eficaz impermeabilização através do aumento da resistência à fendilhação e, consequentemente, a sua durabilidade. A tensão de aderência entre o suporte e o revestimento pode ser verificada recorrendo ao ensaio de arrancamento ou “*Pull-off*”. Uma boa aderência ao suporte melhora, também, o comportamento à fendilhação, na medida em que possibilita uma distribuição de tensões mais eficiente [9].

A compatibilidade com o suporte remete para a necessidade de se evitar que entre a argamassa e o suporte onde esta é aplicada, ocorra a transmissão de tensões elevadas que causem deterioração do suporte ou até o próprio reboco. Esta deterioração pode ocorrer em edifícios antigos quando sujeitos a reabilitação, em que o suporte possui baixa resistência mecânica, ou em edifícios demasiado rígidos em que ocorre a fissuração do reboco devido à transmissão de tensões [9]. De um ponto de vista químico, o reboco deve resistir ao ataque de sais que possam existir no suporte onde é aplicado. Existe também a possibilidade destes

se infiltrarem no interior do reboco e reagirem provocando a degradação dos seus constituintes.

A resistência mecânica deve-se à capacidade que o revestimento tem de resistir a diferentes esforços, quer estes sejam decorrentes de cargas estáticas ou dinâmicas que atuam no edifício ou decorrentes de efeitos das condições ambientais. O revestimento deve acompanhar as deformações consequentes de modo a evitar a sua fissuração [11]. A resistência mecânica pode também ser afetada aquando a aplicação de revestimento em camadas de espessura muito reduzida, geralmente de ligante misto, ou de ligante hidráulico com uma grande quantidade de adjuvantes, aplicados em suportes com fraca resistência ao choque [9].

No caso de um reboco exterior, este deve possuir a função de impermeabilização da fachada, sendo capaz de resistir à penetração de água até ao suporte e, por outro lado, permitir a rápida eliminação da água em excesso por evaporação [9].

Um outro requisito é a permeabilidade ao vapor de água e implica que o revestimento seja capaz de promover a expulsão do vapor de água formado no interior e de água infiltrada por evaporação [10].

A durabilidade, no caso dos revestimentos exteriores, implica uma resistência adequada às diferentes ações atmosféricas e outros agentes suscetíveis de causar danos ao revestimento, causando por vezes danos no próprio suporte.

Quanto ao aspeto estético, é importante garantir a homogeneidade do acabamento, quanto à cor, textura e resistência à fendilhação. O revestimento exterior é o primeiro elemento a sofrer degradação, uma vez que se encontra diretamente exposto aos agentes exteriores. A aparência de um edifício, de um ponto de vista estético, tem um profundo impacto na qualidade de vida e conforto da população.

Das diferentes anomalias que podem surgir em rebocos tradicionais, destacam-se as seguintes: fendilhação (Figura 4a), perda de aderência e consequente desagregação (Figura 4b), erosão (Figura 4c), eflorescências e cripto florescências (Figura 4d) e bio deterioração (Figura 4e).



a) Fendilhação (Fonte: Ecorbis, 2018)



b) Perda de aderência e consequente desagregação (Fonte: APFAC)



c) Erosão (Fonte: Ecorbis, 2018)



d) Eflorescências (Fonte: Ecorbis, 2018)



e) Bio deterioração (Fonte: Ecorbis, 2018)

Figura 4 – Anomalias em reboco

Os revestimentos de argamassas tradicionais são muito suscetíveis à fendilhação, o que acaba por ter um enorme impacto negativo na estética dos edifícios, devido às conseqüentes infiltrações. Esta situação agrava-se também com a generalização do uso de cimento Portland como único ligante, o uso de argamassas demasiado ricas em cimento, o uso de areias inadequadas aplicadas, o uso de apenas uma camada demasiado espessa e o não cumprimento dos cuidados de cura e prazos de secagem requeridos [9].

As anomalias que se observam nas fachadas dos edifícios devem-se essencialmente a constrangimentos económicos, soluções construtivas inadequadas ou erro direto na sua execução. As anomalias mais frequentes em paredes exteriores devem-se a infiltrações e existência de fissuras, sendo que a humidade é a principal causa de anomalias nas fachadas [13].

A humidade tem um papel muito relevante na degradação de um revestimento exterior. Para além da água da chuva, é necessário ter também em conta a existência de água por condensação, capilaridade (essencialmente em paredes enterradas/em contacto com o solo ou paredes de pisos térreos), de condensação e água devido a causas acidentais como o rebentamento de uma canalização ou a existência de aberturas ou juntas onde possam ocorrer infiltrações. Os danos são mais prováveis quando o revestimento é poroso, orientado na horizontal ou com pouca inclinação, pois vai favorecer a acumulação de água, aumentando assim a probabilidade de infiltração. A humidade, eventualmente associada a outros agentes, pode causar a degradação do revestimento de paredes exteriores, nomeadamente [14]:

- Empolamento dos revestimentos, bem como alterações na cor do mesmo e até aspeto;
- Como consequência do empolamento referido no ponto anterior, pode ocorrer o destacamento localizado do revestimento devido à presença prolongada de água que contém sulfatos solúveis que atacam argamassa existente no reboco;
- Desenvolvimento de vegetação ou fungos;
- Formação de eflorescências ou cripto florescências.

O envelhecimento e degradação de um revestimento exterior pode não estar associado à presença de humidade, mas a em situações em que se dá a perda de aderência ou até a sua desagregação devido a retrações ou ações mecânicas. Para evitar a ocorrência destes fenómenos é importante que o revestimento se adeque ao suporte onde vai ser aplicado.

A perda de aderência entre a camada de reboco e o respetivo suporte em que é aplicado, pode ocorrer através de descolamento, abaulamento ou destacamento da camada de reboco. Estes fenómenos podem ser distinguidos da seguinte forma [15]:

- Descolamento – quando ocorre a perda de aderência do reboco à base; é possível identificar quando se submete o reboco a percussão e se ouve um som cavo que se deve à separação entre o reboco e o seu suporte;
- Abaulamento – é verificado quando ocorre o descolamento do reboco em conjunto, surgindo formas convexas ao longo da sua superfície;
- Destacamento – dá-se a separação total do reboco face ao seu suporte.

Um reboco fraco, com baixa resistência ou estrutura porosa, pode levar à perda de coesão entre os seus componentes, provocando a desagregação. Esta anomalia torna o reboco mais suscetível a ataques provenientes de agentes exteriores como microrganismos ou infiltração de água contendo componentes que possam provocar reações químicas adversas.

A biodeterioração de um revestimento deve-se, geralmente, à infiltração de humidade em zonas específicas do revestimento, provocando o desenvolvimento de vegetação e bolores.




Outros fatores agravantes, são também a falta de ventilação, falta de iluminação ou sujidade, que facilitam a proliferação de microrganismos que provocam a degradação do revestimento [15].

A fendilhação de um revestimento ocorre quando este ultrapassa a sua resistência e consequentemente fendilha, originando uma descontinuidade. As causas deste fenómeno podem ser diversas, nomeadamente:

- Dosagem inadequada dos diferentes componentes;
- Elevado efeito de retração;
- Espessura inadequada;
- Deformações ou anomalias do próprio suporte onde é aplicada.

Na Tabela 3 apresentam-se alguns exemplos de fendilhação que ocorrem em revestimentos exteriores.

Tabela 3 – Exemplos de fendilhação em revestimentos exteriores [8]

Tipo de fendilhação	Exemplo	Causas
Por retração		Este tipo de fissuras tem, geralmente, uma espessura muito reduzida, não possui orientação definida e encontra-se distribuída por toda a superfície. Estas ocorrem aquando uma exagerada retração, no início da secagem ou em posteriores ciclos de humedecimento-secagem.
Em escada		Este tipo de fendas possui, geralmente, uma espessura significativa e pode surgir devido à ocorrência de assentamentos diferenciais das fundações ou deformações em elementos como vigas ou lajes, que sirvam de apoio às paredes.
Ao longo da fronteira entre materiais distintos		Este tipo de fendilhação está associado ao suporte em que o revestimento é aplicado. A fendilhação surge, em materiais de suporte diferentes, revestidos em continuidade, quando ocorrem alterações dimensionais diferenciais (variação do teor de água) ou da temperatura.

É imperativo atribuir a devida importância à escolha das soluções construtivas a adotar, bem como escolher adequadamente a composição da argamassa de revestimento a aplicar em determinada estrutura e sujeita às condições ambientais a que a mesma está.

2.2.1. LIGANTES

Os ligantes têm com principal função aglutinar os diversos constituintes da argamassa e com o tempo, promover o endurecimento da pasta e a sua aderência ao suporte onde será aplicada. Estes podem dividir-se em dois grupos distintos: ligantes orgânicos e ligantes inorgânicos. Os ligantes inorgânicos podem ainda ser classificados como aéreos ou hidráulicos, conforme a Tabela 4.

Tabela 4 - Classificação dos materiais ligantes usados em obras de engenharia, de acordo com a sua afinidade para a água [16]

Afinidade para a água		Exemplos
Hidrófilo Substância inorgânica sólida que reage quimicamente com a água.	Aéreo Ganha presa e endurece ao ar. Depois de endurecido, não é estável dentro de água.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Materiais: Gesso e cal aérea; ▪ Aplicações: Cerâmica e argamassa.
	Hidráulico Ganha presa e endurece ao ar ou dentro de água. Mantém a estabilidade e a resistência nos dois meios.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Materiais: Cimento, cal hidráulica e escória de alto-forno; ▪ Aplicações: Betão, argamassa e calda.
	Hidrófobo Substância orgânica sob a forma de líquido viscoso ou sistema coloidal que endurece por cura térmica, evaporação do solvente ou reação química entre os componentes. A água não interfere no processo de endurecimento, e o material endurecido repele-a.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Materiais: Hidrocarboneto (betume, alcatrão); ▪ Aplicações: Impermeabilização, pavimento e revestimento superficial.

O ligante mais usado na construção é o cimento de Portland, um ligante hidráulico. Este facto deve-se, essencialmente à sua boa durabilidade, versatilidade e também às suas propriedades hidráulicas. Estas propriedades hidráulicas conferem ao ligante a capacidade de endurecer e conseguir manter a sua resistência, tanto ao ar como na água, sem que ocorra a sua decomposição. Tem sido o ligante hidráulico mais utilizado dado a rapidez com que faz presa.

Relativamente ao seu processo de fabrico, é possível dividi-lo em 3 fases principais: extração e preparação da matéria-prima, cozedura e moagem [17]. Na Figura 5 encontram-se esquematizadas, de um modo geral, as diferentes etapas do processo de fabrico do cimento.

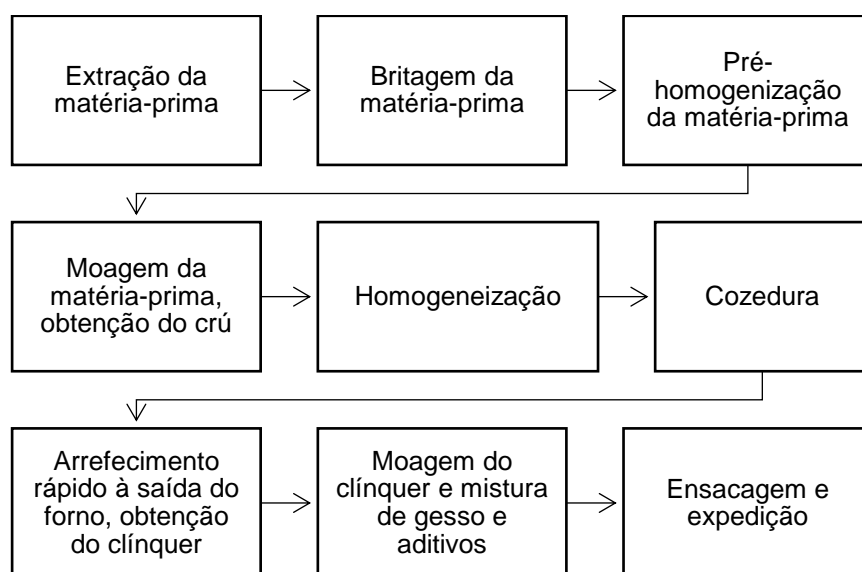


Figura 5 - Diagrama do processo de produção do cimento por via seca - Adaptado de: [16]

A mistura da matéria-prima é doseada, controlada e corrigida após perda de água e dióxido de carbono por ação da temperatura no forno, de modo a obter-se uma composição dentro dos limites constantes na Tabela 5 [18].

Tabela 5 - Composição química geral dos cimentos [19]

Designação	Constituição química	[%]
Óxido de cálcio/cal	CaO (C)	60 a 68
Sílica	SiO ₂ (S)	17 a 25
Alumina	Al ₂ O ₃ (A)	2 a 9
Óxidos de ferro	Fe ₂ O ₃ (F)	0,5 a 6
Óxido de magnésio	MgO	0 a 2
Óxido de sódio e óxido de potássio	Na ₂ O+K ₂ O	0,5 a 1,5

Observam-se também, na Tabela 5, componentes em menores quantidades (inferiores a cerca de 2%) como é o caso dos óxidos de magnésio (MgO), de sódio (Na₂O) e de potássio (K₂O), o que se deve, essencialmente, à matéria-prima e combustíveis usados no fabrico do cimento [20].

Dentro do processo de fabrico do cimento, existem alguns fatores importantes que são tidos em conta, nomeadamente [17]:

- A matéria-prima necessária à produção do cimento é extraída em períodos, e por vezes pedreiras, diferentes. Estas condições vão criar alguma inconsistência ou

- variabilidade no produto extraído, daí a importância de efetuar a pré-homogeneização pois esta vai garantir a homogeneidade do cimento produzido;
- b) Uma adequada moagem da matéria prima é também um passo essencial, na medida em que uma adequada finura vai facilitar o aquecimento homogêneo e o contacto dos diferentes materiais, bem como promover o desenvolvimento das diferentes reações químicas;
 - c) Depois da cozedura, é feita uma análise química à mistura que é, geralmente, corrigida adicionando pequenas quantidades de óxido de ferro, areia siliciosa e bauxite;
 - d) O processo de arrefecimento é efetuado muito rapidamente com o objetivo de evitar que ocorra a inversão das reações químicas que tiveram lugar no forno durante a cozedura;
 - e) Na penúltima fase do processo, é feita a moagem do clínquer adicionando-se uma pequena quantidade de gesso que vai funcionar como regulador de presa. O gesso utilizado para combinação com os aluminatos é introduzido numa percentagem aferida ao longo da produção, mas que geralmente ronda os 5% [18]. Nesta fase são também feitas as adições necessárias dependendo do tipo de cimento a fabricar.

O cimento de Portland é essencialmente composto por clínquer. Durante a fase de cozedura das matérias primas do clínquer e, face às temperaturas elevadas, dão-se reações químicas que vão originar os seus principais compostos. Os constituintes que mais contribuem para as resistências mecânicas do cimento são o silicato tricálcico (C_3S) e o silicato bicálcico (C_2S), que se encontram envolvidos por uma matriz de aluminato tricálcico (C_3A) e de ferroaluminato tetracálcico (C_4AF) (estrutura constituída por cristais muito pequenos), tal como se observa na Figura 6 [17].

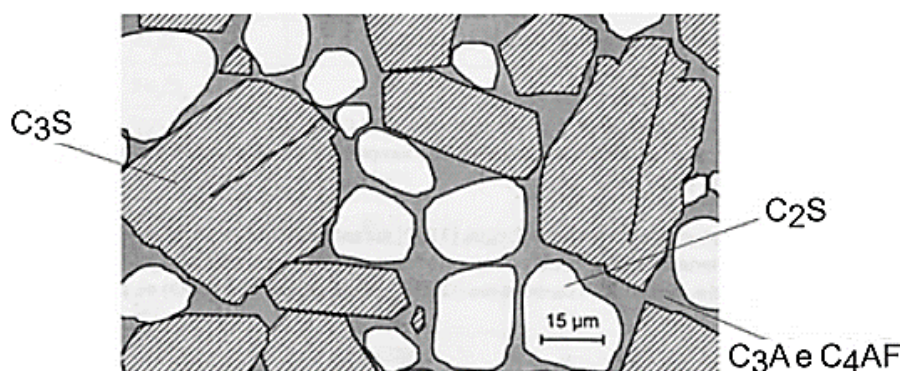


Figura 6 - Imagem esquemática da superfície do clínquer obtida por microscópio ótico (x100) [21]

Os compostos principais, do clínquer do cimento Portland do tipo I (CEM I) são indicados na Tabela 6, bem como a percentagem e a contribuição de cada um para as propriedades do cimento.

Tabela 6 - Composição do clínquer do cimento de Portland (CEM I) - Adaptado de: [20] e [22]

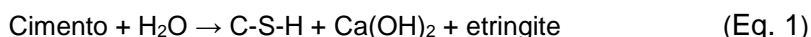
Designação	Constituição química	Quantidade [%]	Contribuição para as propriedades do cimento
Silicato tricálcico (Alite)	C_3S	40 a 80	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Calor de hidratação elevado e rápido; ▪ Velocidade de hidratação elevada; ▪ Desenvolvimento da resistência mecânica rápido e elevado; ▪ Elevada resistência mecânica; ▪ Reduzida resistência química.
Silicato bicálcico (Belite)	C_2S	0 a 30	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Calor de hidratação reduzido e lento; ▪ Velocidade de hidratação lenta; ▪ Desenvolvimento da resistência mecânica lento e muito prolongado; ▪ Elevada resistência mecânica; ▪ Média resistência química.
Aluminato tricálcico (Celite)	C_3A	3 a 15	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Calor de hidratação reduzido e lento; ▪ Desenvolvimento de presa muito rapidamente, pelo que exige a adição de gesso, mas apenas contribui para a resistência mecânica nos primeiros tempos; ▪ Não liberta cal na sua hidratação, ao contrário, pode fixar uma certa proporção de cal livre, libertado pelos silicatos; ▪ É muito sensível aos sulfatos em geral, com os quais reage dando lugar a produtos expansivos (Sal de Candlot).
Ferroaluminato tetracálcico (Ferrite)	C_4AF	4 a 15	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Calor de hidratação reduzido e lento; ▪ A velocidade de hidratação é lenta e a sua contribuição para a resistência mecânica é desprezável; ▪ Apresenta uma boa resistência química.

Os constituintes do cimento de Portland, em contacto com a água, vão desencadear uma série de reações químicas complexas, que vão ocorrer em simultâneo, originando várias alterações tanto a nível físico como químico e mecânico [23].

Em contacto com a água, os silicatos e aluminatos que existem na constituição do cimento, vão originar novos compostos que cristalizam e que, ao interligar entre si, conferem resistência ao conjunto. Ao longo deste processo a pasta vai gradualmente endurecer e adquirir propriedades físicas, químicas e mecânicas da pasta de cimento endurecida. [17].

A hidratação do cimento envolve, portanto, uma transformação, à temperatura ambiente, de uma suspensão fluída num sólido, sem a necessidade de aquecimento ou outros processos. No processo de hidratação do cimento, ocorre uma sequência de reações químicas entre os componentes do clínquer, o sulfato de cálcio (gesso) e a água.

De um modo simplificado, é possível resumir este processo de acordo com a seguinte equação (Eq. 1).



Em que, C-S-H representa o gel de silicato de cálcio hidratado e Ca(OH)_2 o hidróxido de cálcio.

Dada a complexidade das reações que envolvem a hidratação do cimento de Portland, a melhor maneira de entender este fenómeno é analisar o “papel” dos principais compostos envolvidos no processo:

- Silicato tricálcico (C_3S): o C_3S vai reagir com a água libertando hidróxido de cálcio. Por sua vez, uma parte do hidróxido de cálcio fica em solução, enquanto que a outra cristaliza e o silicato, perdendo o cálcio, dá origem ao bissilicato tricálcico hidratado [24];
- Silicato bicálcico (C_2S): o C_2S reage com a água libertando hidróxido de cálcio, mas em menor quantidade, transformando-se noutro silicato hidratado com maior estabilidade do que o composto hidratado formado pela hidratação do silicato tricálcico;
- Aluminato tricálcico (C_3A): este composto tem uma ação rápida na reação com a água, conduzindo assim, a uma presa instantânea. O C_3A , em contacto com uma solução saturada de hidróxido de cálcio, transforma-se num aluminato tetracálcico hidratado. Na presença dos componentes dissolvidos do gesso, Ca^{2+} e SO_4^{2-} , o C_3A é convertido em etringite sendo esta uma reação bastante exotérmica;
- Ferroaluminato tetracálcico (C_4AF): o C_4AF reage de modo muito semelhante ao C_3A , formando etringite na presença de gesso, no entanto, a sua reação é muito mais lenta. Se não houver gesso suficiente para converter o C_4AF em etringite, é formado um gel rico em ferro na superfície das partículas de silicatos com o propósito de abrandar a sua hidratação.

De modo a avaliar o efeito de substituições parciais, do cimento de Portland por outros compostos, é também relevante perceber a cinética da hidratação do cimento, ou seja, compreender as etapas, mecanismos e tempos envolvidos neste processo.

Na Figura 7, consta uma representação da evolução da reação de hidratação, que é acompanhada por libertação de calor, de um cimento Portland.

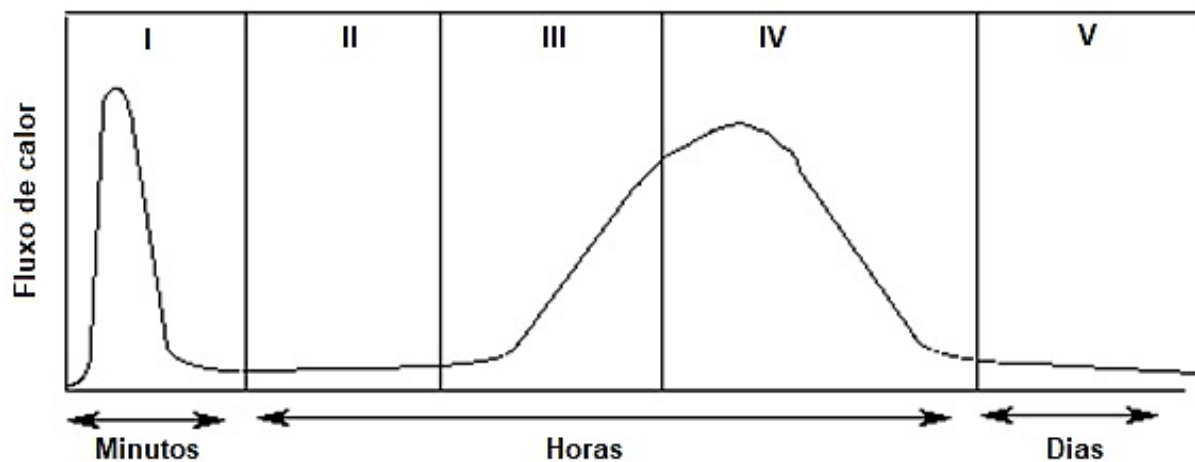
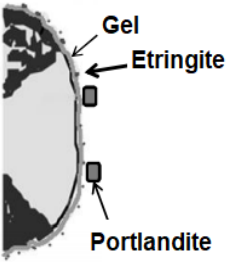
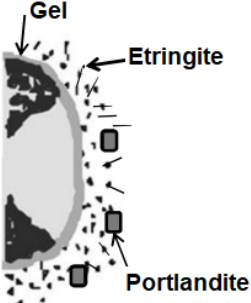
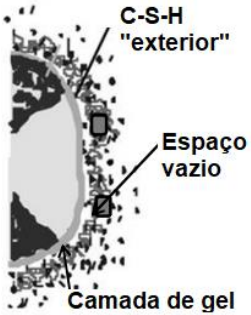




Figura 7 - Esquema da evolução do fluxo de calor na hidratação do cimento - Adaptado de: [25]

É possível definir cinco etapas que ocorrem ao longo da hidratação do cimento [26]. Na Tabela 7 são representadas, de forma resumida, as etapas associadas ao processo de hidratação do cimento, bem como a sua duração, principais fenômenos e produtos formados.

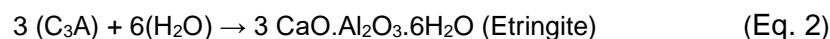
Tabela 7 - Resumo das cinco etapas do processo de hidratação do cimento – Adaptado de: [27] e [28]

Designação da etapa	Fenómenos principais	Esquematização dos produtos formados
I Hidratação inicial (0 - 15 minutos)	<ul style="list-style-type: none"> O pH aumenta rapidamente (>12); Dá-se uma rápida dissolução; Reação de hidratação do C_3A com o gesso formando a etringite; Acumulação progressiva de uma camada protetora de gel rico em aluminato. 	
II Período de indução ou fase dormiente (15 minutos - 4 horas)	<ul style="list-style-type: none"> Dissolução lenta; O gel atua como uma barreira de difusão; As agulhas da etringite ficam mais alongadas; A pasta permanece fluida. 	
III Período de aceleração ou presa (4 - 8 horas)	<ul style="list-style-type: none"> Dá-se uma acelerada reação do C_3S formando gel C-S-H exterior, agulhas de etringite e portlandite; É criado um espaço vazio entre os grãos superficiais e a superfície hidratada; Começa a dar-se a presa e a solidificação; Dá-se a rotura da camada de gel devido à pressão osmótica. 	
IV Período de desaceleração e endurecimento (8 - 24 horas)	<ul style="list-style-type: none"> Dá-se a hidratação secundária do C_3S produzindo longas agulhas de etringite; Os produtos internos C-S-H começam a formar-se pelo interior da superfície; Dá-se uma desaceleração devido à densificação da camada de hidratação formada. 	

<p>V</p> <p>Cura – Controle da difusão (1-28 dias)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Todo o gesso é consumido e a etringite decompõe-se em monossulfato pela reação da etringite com a silicato tricálcico; ▪ Continuação da formação de C-S-H; ▪ Redução da separação entre o grão e a superfície hidratada; ▪ Difusão controlada da hidratação podendo durar vários dias ou até anos. 	 <p>Monossulfato</p>
--	---	---

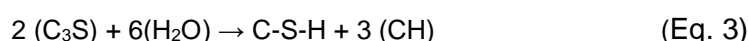
De seguida, é feita uma análise aprofundada, dos pontos mais relevantes, das diferentes etapas envolvidas no processo de hidratação do cimento.

Aquando a mistura do cimento com água, dá-se uma inicial produção de etringite e precipitação de CH (hidróxido de cálcio ou portlandite). Estes dois compostos, combinados e ao longo do tempo, vão formar uma camada à superfície das partículas de cimento agindo como uma barreira de difusão à água. Estas reações vão causar o pico no fluxo de calor que se observa na Etapa I da Figura 7. Esta primeira etapa é, assim, caracterizada pelo processo de dissolução (mistura de cimento com a água) e formação de etringite (Eq. 2), aquando a reação do C₃A com a água.



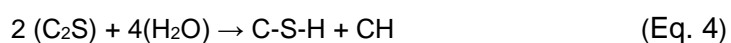
Na Etapa II, a camada referida na etapa anterior, começa a envolver as partículas de cimento e, à medida que esta camada vai aumentando de espessura, dificulta o acesso da água ao interior da partícula do cimento anídrico, ocorrendo uma desaceleração gradual das reações de hidratação, começando um período de indução ou fase dormente. É nesta etapa que se procede à aplicação do material cimentício e, portanto, importa referir que, se a concentração de gesso for muito baixa, pode provocar a rigidez da pasta originando, assim, uma presa rápida e dificultando a sua aplicação. Se, por outro lado, a concentração de gesso for muito elevada, pode dar origem a uma “falsa presa” conferindo uma rigidez prematura [29].

A restante água que permanece à superfície vai continuando a reagir com os compostos C₃S e C₂S formando o hidróxido de cálcio (CH) e o gel amorfo de C-S-H (gel de silicato de cálcio hidratado) conforme a seguinte equação (Eq. 3).



O hidróxido de cálcio (CH) e o gel amorfo de C-S-H, por sua vez, vão crescer dentro da camada superficial, formada inicialmente, acabando por romper este elemento e permitir a hidratação do restante cimento anídrico.

Na Etapa III, dá-se o segundo pico exotérmico, sendo retomadas as reações origina-se uma elevada libertação de calor, cerca de 3 a 12 horas após a mistura do cimento com água. Durante este período, a precipitação dos hidratados vai aumentar o contacto entre as partículas promovendo, assim, a presa do cimento. A elevada hidratação de C_3S promove a formação de C-S-H e a precipitação da portlandite. Ocorre, portanto, uma diminuição da concentração de Ca^{2+} e SO_4^{2-} devido à formação de etringite e inicia-se a hidratação do C_2S (Eq. 4).



Na Etapa IV, dá-se uma significativa redução do calor de hidratação consequente da diminuição das reações iniciais com o C_3S . Nesta etapa, ao contrário da anterior, a maioria das reações dão-se com o C_2S e não com o C_3S . Este abrandamento após o pico exotérmico observado na etapa III, deve-se à conversão da etringite em monossulfato de cálcio hidratado, devido ao *deficit* de iões de sulfato na água dos poros. *Deficit* este, consequente da formação da segunda camada de superfície exterior das partículas de cimento, a camada de difusão, que dificulta o acesso da água ao cimento anídrico. A água residual vai hidratando os restantes compostos C_3S até que os constituintes restantes por hidratar sejam C_2S .

É nesta etapa, também, que se inicia o endurecimento da pasta de cimento em que, após totalmente hidratado, é constituída essencialmente por cristais de portlandite [24].

Na Etapa V, etapa final, dá-se uma difusão controlada da hidratação, onde os hidratos se podem formar durante vários dias ou até anos, após se dar a presa. Este período vai ser tão longo quanto maior for a quantidade água e compostos por hidratar. A porosidade vai diminuindo, bem como a razão água/cimento.

Para além das reações que ocorrem nas equações (Eq. 3) e (Eq. 4), dá-se também uma reação pozolânica. Este tipo de reação ocorre devido à capacidade da sílica e da alumina amorfa dos componentes pozolânicos se combinarem com o hidróxido de cálcio, na presença de água, para formarem silicatos e aluminatos de cálcio (hidratados) do tipo dos que se desenvolvem com a hidratação do cimento Portland [18]. Conforme se observa no esquema da Figura 8, esta reação vai ajudar, na produção de C-S-H.

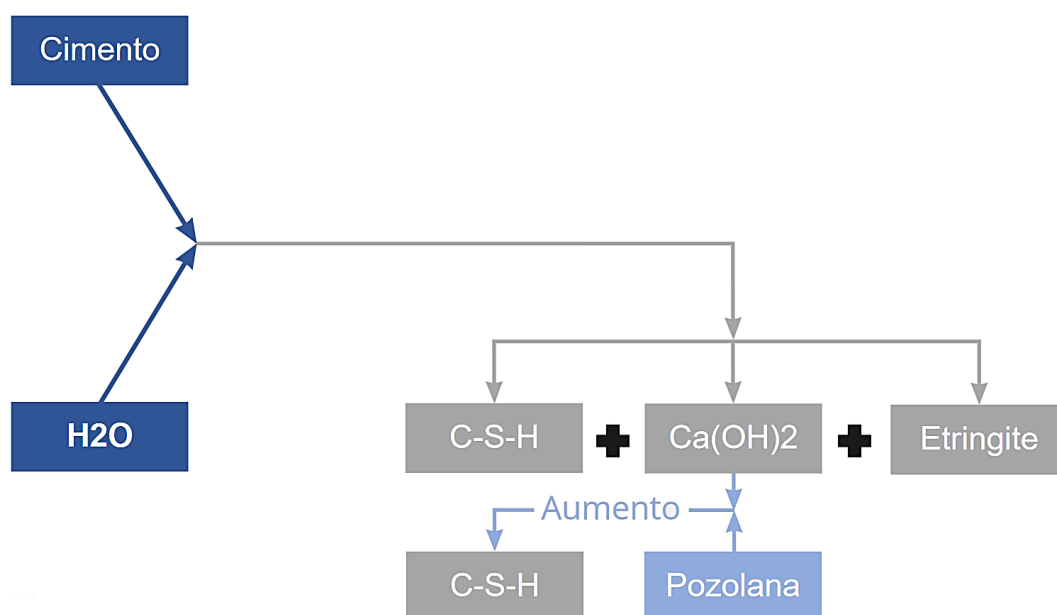


Figura 8 - Contribuição das pozolanas na reação de hidratação do cimento

Assim, a diferença principal entre a reação pozolânica e as reações envolvidas na hidratação do cimento Portland não está na composição dos seus produtos de hidratação, mas sim na taxa em que os mesmos são formados [30].

Ao cimento de Portland, constituído essencialmente por clínquer, são ainda adicionados determinados constituintes que, de acordo com a norma [31], podem ser distinguidos consoante constituinte principal ou adicional minoritário:

- a) Constituinte principal – “Material inorgânico especialmente selecionado e utilizado numa percentagem superior a 5% em massa em relação à soma de todos os constituintes principais e adicionais minoritários”. Sendo estes:
 - Escória granulada de alto forno (S);
 - Pozolana natural (P);
 - Pozolana natural calcinada (Q);
 - Cinza volante siliciosa (V);
 - Cinza volante calcária (W);
 - Xisto cozido (T);
 - Calcário (L ou LL);
 - Sílica de fumo (D).
- b) Constituinte adicional minoritário – “Material inorgânico especialmente selecionado e utilizado numa percentagem não excedendo um total de 5% em massa em relação à soma de todos os constituintes principais e adicionais minoritários”. Destes fazem parte o gesso, que permite regular a presa, ou aditivos (quantidade nunca superior a 1%) que modifiquem as propriedades do cimento.

Os vários tipos de cimento Portland existentes resultam das suas diferentes composições. A NP EN 197-1: 2001 [32] apresenta 5 tipos de cimento principais que se subdividem-se em 27 tipos de cimento corrente. A seleção do cimento a usar deve ter em conta diversos critérios, entre os quais as condições de cura e as condições ambientais à qual a estrutura ficará exposta [31].

2.2.2. AGREGADOS

Os agregados são um material granulado, sem propriedades aglutinantes, usado na formulação de argamassas e, regra geral, as areias são os agregados mais utilizados na execução de argamassas de revestimento. Os agregados não intervêm na reação de endurecimento da argamassa.

É possível classificar os agregados consoante os seguintes critérios: petrográfico, massa volumica, dimensão, obtenção e baridade [33].

Relativamente à petrografia, os agregados podem ser classificados conforme as rochas das quais são originários. Posto isto, os agregados podem ser ígneos quando se formam a partir do magma; sedimentares quando se formam pela deposição ou precipitação dos produtos de meteorização ou erosão de rochas existentes; e por final, metamórficos quando se formam a partir de rochas pré-existentes, devido a transformações estruturais e mineralógicas, por ação da pressão na crosta terrestre e ou calor [34].

De acordo com [18] os agregados podem ser classificados como grossos ou finos. As areias, que constituem o esqueleto das argamassas, são classificadas como agregado fino, sendo habitual uma dimensão máxima de 4,75 milímetros na sua constituição. Um agregado pode ainda ser classificado como fíler quando o material passa no peneiro de 0,063 milímetros.

A obtenção dos agregados pode ser; natural (areia rolada, seixos, godos), quando estes são de origem mineral e explorados em depósitos minerais; artificial (brita) quando o material resulta da britagem da rocha numa pedreira. Os agregados podem ser também artificiais, quando resultam de um processo industrial que precede a sua modificação, ou reciclado quando provenientes de resíduos industriais e se adequam à utilização em argamassas.

Dado que um dos critérios mais importantes de um revestimento é a sua durabilidade, principalmente quando exposto a ambientes agressivos e suscetíveis de deterioração, e que, em média, 70% do volume das argamassas é constituído por agregados, são exigidas determinadas propriedades essenciais, tais como: adequada resistência, propriedades física e quimicamente adequadas ao ligante a usar, isenção de substâncias que possam ser prejudiciais, bem como forma e dimensões adequadas à mistura.

Diferentes dimensões do agregado vão auferir diferentes desempenhos às argamassas. As areias mais grossas, por exemplo, devem ser utilizadas para reduzir a tendência à fendilhação enquanto que as areias mais finas permitem reduzir a porosidade e a absorção de água.

No entanto, este conceito nem sempre é linear. Em argamassas com areias finas vai ser necessária uma maior quantidade de água, que acaba por ter como consequência uma maior fissuração por retração durante a fase de endurecimento [35]. Uma elevada retração da argamassa pode estar também associada à presença de argila, daí ser importante que os agregados se encontrem isentos de sais ou qualquer matéria orgânica [36].

2.2.3. ÁGUA

A água adquire elevada importância na produção de uma argamassa e a sobredosagem deste componente, numa argamassa, pode resultar numa maior porosidade aberta, diminuindo assim a resistência e a qualidade do revestimento. Já a sob dosagem deste componente pode ter como consequência o aparecimento de fissuras devido a uma acentuada retração da argamassa.

É também necessário adequar o suporte, na medida em que a aplicação da argamassa sobre uma base demasiado seca provoca retração por secagem. Assim sendo, deve ser adicionada uma quantidade de água necessária à hidratação do cimento, que confira a consistência e trabalhabilidade pretendida. A água, como componente essencial numa argamassa, vai promover a hidratação do cimento e a aglutinação dos agregados. Segundo [10] a resistência da mistura vem da reação entre os sais minerais que compõem o cimento e a água, dado que estes dão origem a um novo sistema de compostos hidratados estáveis que cristalizam, tendencialmente se interligam e colam uns aos outros.

Para quantificar corretamente a quantidade de água a usar, determina-se a relação água/ligante e, dependendo das características pretendidas, tanto no estado fresco como no estado endurecido, obtém-se um valor de referência. Por outro lado, é também importante garantir que a água a utilizar se encontra livre de quaisquer impurezas, nomeadamente sais, matéria orgânica, entre outros, suscetíveis de diminuir a resistência mecânica do reboco ou causar o posterior aparecimento de anomalias que provoquem a degradação acelerada do revestimento.

2.2.4. ADIÇÕES

As adições são um material inorgânico, finamente moído e em pequenas quantidades, que é adicionado à argamassa, ou betão, com o objetivo de modificar as suas propriedades no estado fresco ou endurecido. As adições podem ser divididas em duas categorias consoante a sua reatividade [31]:

- Adições quase inertes (Tipo I) – não possuem propriedades pozolânicas ou propriedades hidráulicas (e.g. fíler calcário).

- Adições pozolânicas ou hidráulicas latentes (Tipo II) – apresentam propriedades hidráulicas latentes (e.g. escória de alto forno) ou propriedades pozolânicas (e.g. pozolana natura, cinza volante ou sílica de fumo).

As adições do Tipo I correspondem a agregados, cuja grande parte passa através do peneiro de 0,063 milímetros. Este tipo de adição permite tornar a mistura mais compacta, dado que os micro espaços entre as partículas com maiores dimensões são ocupados e a área de espaços vazios é diminuída.

As adições do Tipo II, são constituídas por produtos com fracas ou quase nulas propriedades hidráulicas e aglomerantes. No entanto, a capacidade de gerar produtos de hidratação é melhorada quando os seus componentes, na presença de água, reagem com os diferentes componentes do cimento e com o hidróxido de cálcio, com o qual têm elevada reatividade. Este tipo de adição permite reduzir a quantidade de cimento a usar na mistura, o que possui diversas vantagens como diminuição do seu custo global, das emissões de CO₂ para a atmosfera e o do consumo de energia, para além de outras.

Podem ocorrer três tipos de efeitos aquando o uso de adições minerais no cimento de Portland, sendo estes o efeito de diluição, efeito físico e o efeito químico [37]. Ao proceder à substituição do cimento por uma adição mineral, ou seja, ao diminuir a quantidade de cimento, vai dar-se um aumento da relação água/cimento efetiva. É nesta situação que se dá o efeito de diluição, que vai originar um menor volume de produtos de cimento hidratado. Em termos de efeitos físicos, destaca-se o efeito de fíler que, ao preencher os espaços vazios, altera tanto a porosidade inicial da pasta como a quantidade de água necessária para determinada trabalhabilidade. Relativamente ao efeito químico, remete para a reação pozolânica ou cimentícia da adição mineral.

O uso de adições de cinza volante e de fíler calcário, como substituição (em percentagens previamente determinadas) do cimento de Portland, apresenta diversas vantagens. A adição de cinza volante ou fíler calcário, quer em conjunto ou separada, diminui o tempo de cura face a um cimento de Portland comum, especialmente quando adicionada em percentagens entre os 20 e os 30% [38].

A substituição parcial do cimento por outros materiais apresenta diversas vantagens, nomeadamente ambientais, económicas e tecnológicas. De um ponto de vista ambiental, são diminuídos os consumos e emissões de CO₂ associados ao processo de fabrico do clínquer. Se esses materiais forem ainda resíduos de outras indústrias, o seu uso torna-se vantajoso quer de um ponto de vista ambiental como económico. A nível tecnológico, a substituição parcial do cimento por outros constituintes pode levar ao desenvolvimento de um material com melhores propriedades mecânicas e também maior durabilidade devido ao aumento da densidade da matriz do ligante [16].

2.2.4.1. CINZA VOLANTE

De acordo com a NP EN 450-1:2012 [39], a cinza volante é definida como um pó fino constituído, principalmente, por partículas esféricas e vítreas, com propriedades pozolânicas, que são constituídas essencialmente por sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3) e obtidas através da queima de carvão pulverizado contendo no mínimo 25% em massa de SiO_2 reativo.

A cinza volante possui na sua constituição um teor de carbono (geralmente designado por *teor de inequeimados*) que é avaliado através do ensaio de perda ao fogo [17]. A NP EN 197-1:2012 [32] estabelece que as cinza volante devem apresentar valores de perda ao fogo inferiores a 5% para que possam ser utilizadas como constituinte do cimento. Este valor pode, no entanto, ir até aos 7% caso de trate de cinza volante com qualidade inferior.

As adições pozolânicas, ou pozolanas, são constituídas essencialmente por sílica e alumina. Este tipo de composto, para além das suas propriedades aglomerantes hidráulicas, possui a capacidade de se combinar com o hidróxido de cálcio, na presença de água, e formar compostos com propriedades aglomerantes semelhantes aos originados na hidratação dos constituintes do cimento conforme referencia também Machado S. [40].

Na Figura 9 apresenta-se uma imagem microscópica de cinza volante, ampliada 500 e 2000 vezes.

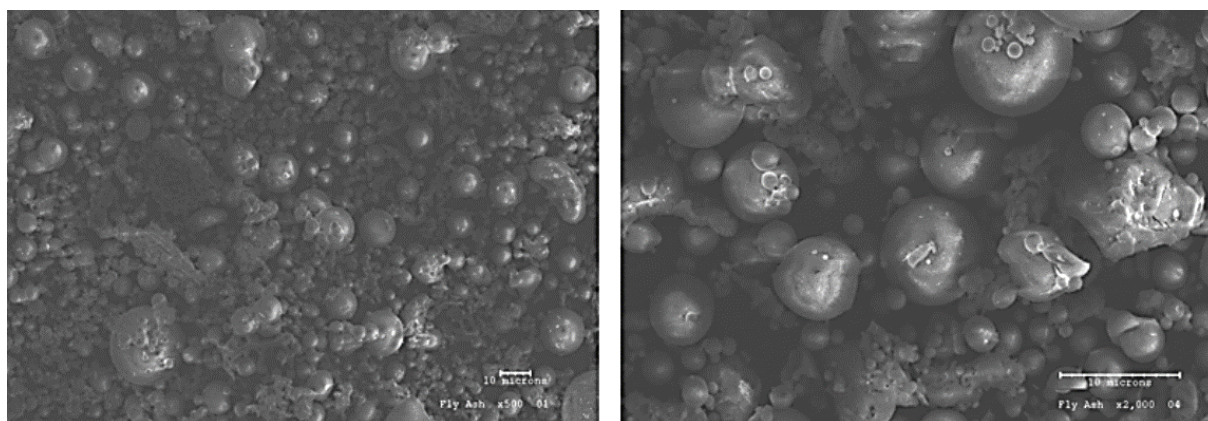


Figura 9 - Imagens da análise por SEM de cinza volante, foto ampliada a) 500x e b) 2000x [18]

A cinza volante, a adicionar aos cimentos, pode ser de origem siliciosa (V) ou origem calcária (W).

A cinza volante siliciosa ($\text{CaO} < 10\%$) consiste num pó fino (formado por partículas esféricas), com propriedades pozolânicas, constituído por sílica reativa (SiO_2) e alumina (Al_2O_3). A cinza volante calcária ($\text{CaO} > 10\%$, geralmente 15-35%) consiste num pó fino, com propriedades hidráulicas e ou pozolânicas, constituído por óxido de cálcio (CaO), sílica reativa (SiO_2) e alumina (Al_2O_3).

Esta distinção entre tipos de cinza volante, advém do teor de óxido de cálcio (CaO) presente nelas, a composição química do carvão que as origina e o tipo de caldeira utilizado [40].

A adição de cinza volante provoca diversos efeitos numa argamassa nomeadamente [17]:

- Redução do calor de hidratação;
- Redução da velocidade de reação;
- Aumento do tempo de presa;
- Redução da resistência inicial;
- Redução da quantidade de água da amassadura;
- Menor concentração de hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$);
- Redução da permeabilidade;
- Maior resistência química (para percentagens de substituição superiores a 30%);
- Alteração da cor (a cinza volante escurece a mistura).

Ahmaruzzaman M. [41] observou que o uso de cinza volante como substituição parcial do cimento se traduzia numa libertação de calor de hidratação inferior e na diminuição da quantidade de água necessária na mistura.

A influência da substituição parcial de cimento por cinza volante na resistência à compressão de uma argamassa ao traço volumétrico 1:3 foi estudada por Christy C. e Tensing D. [42]. Na Figura 10, é possível observar que se obteve uma resistência à compressão superior em argamassas com substituição parcial de 30% do cimento por cinza volante.

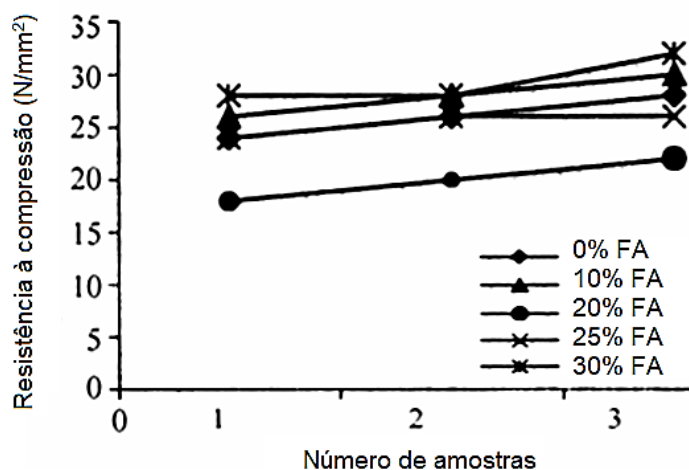


Figura 10 – Resistência à compressão de uma argamassa de cimento, com traço 1:3 com substituição parcial de cimento por cinza volante – Adaptado de: [41]

Por outro lado, [42] verificaram (Figura 11) uma elevada resistência à compressão na argamassa com substituição de 10% do ligante (cimento) por cinza volante e um traço de 1:3 (areia: ligante). Verificaram também para essa mesma argamassa, um aumento a longo prazo, da força de ligação/coesão quando aplicada em alvenaria.

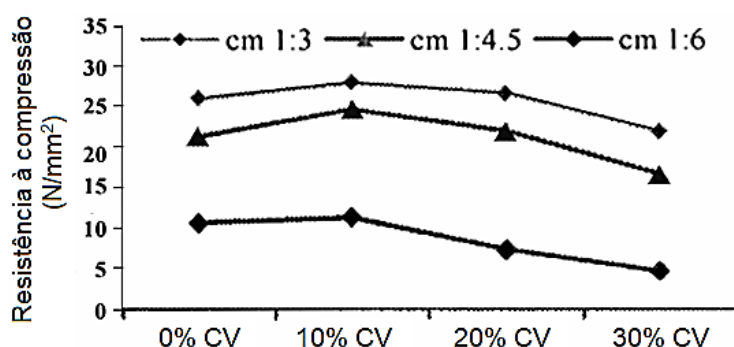


Figura 11 - Influência do traço e substituição parcial do cimento por cinza volante na resistência à compressão de uma argamassa de cimento - Adaptado de: [41]

Curiosamente, de todas as adições, a cinza volante é a mais utilizada na fabricação de argamassas industriais. Para além da sua capacidade de retardar o início da presa, ao contrário do que acontece com as outras pozolanas, permite aumentar a trabalhabilidade da argamassa e facilitar a sua projeção [43]. Das diversas vantagens associadas ao uso de cinza volante, quer seja como adição ou como substituição do cimento, destaca-se também a vantagem económica. Até à descoberta do seu potencial, este era um resíduo industrial sem grande utilidade e, uma vez que tem um custo inferior, acaba por ser uma excelente opção. Uma outra vantagem incide também no conceito da sustentabilidade, na medida em que se diminuem as libertações de CO_2 associadas à produção do clínquer [44].

2.2.4.2. FÍLER CALCÁRIO

O calcário, como adição ao cimento de Portland, consiste num pó fino (finura próxima ao cimento de Portland) com um teor mínimo de carbonato de cálcio de 75% em massa, teor de argila igual ou inferior a 1,20 gramas por 100 gramas.

O fíler de calcário, uma vez que não foi sujeito a ativação térmica, é considerado um material inerte, ou seja, não possui propriedades hidráulicas. A norma [32] considera dois tipos de fíler calcário, L ou LL, em que L representa a palavra em inglês *Limestone*, que significa calcário. O primeiro tipo (L) apresenta um teor em carbono orgânico igual ou inferior 0,50% e o segundo tipo (LL) inferior a 0,20% em massa.

O termo fíler advém do termo inglês *fill* que se traduz por preencher, ocupar. Aplicado às argamassas, um fíler tem como objetivo principal preencher os espaços que existam entre os restantes compostos da argamassa, obtendo-se assim uma mistura mais compacta (maior resistência) e com menor porosidade. Esta diminuição da porosidade poderá, de acordo com [38], ser o motivo pelo qual estes verificaram uma maior estabilidade em argamassas com adição de fíler calcário quando em contacto com soluções ácidas.

Na Figura 12 apresenta-se uma imagem microscópica de fíler calcário, ampliada 63 (Figura 12a) e 60 vezes (Figura 12b).

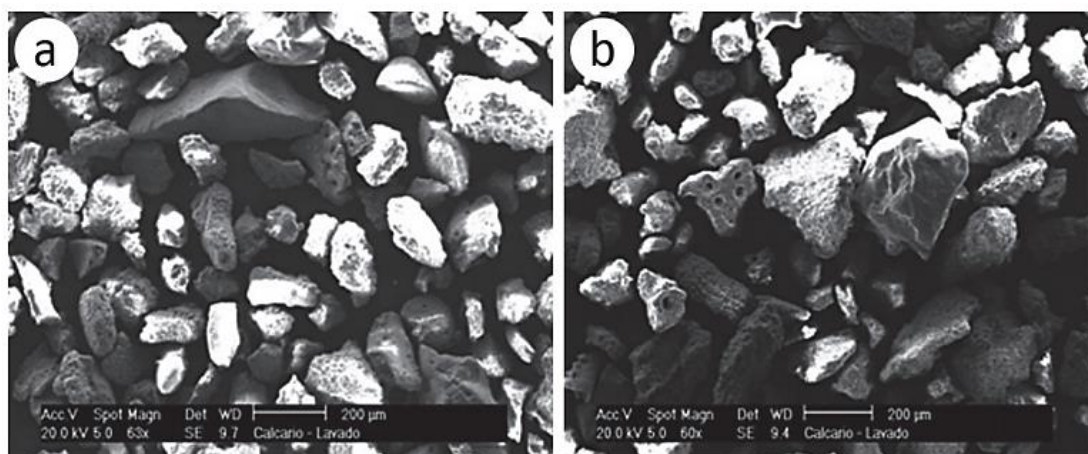


Figura 12 - Fíler calcário, foto ampliada 63 vezes (a) e 60 vezes (b) [45]

Este composto difere das demais adições, na medida em que pouco reage com os componentes do cimento hidratado, ou seja, não possui propriedades pozolânicas, agindo apenas ao nível da porosidade e granulometria da mistura. De acordo com [46], a utilização do fíler calcário provoca efeitos benéficos nas seguintes propriedades:

- a) Trabalhabilidade;
- b) Densidade;
- c) Permeabilidade;
- d) Capilaridade;
- e) Exsudação;
- f) Tendência para a fissuração.

De acordo com [17] as partículas de fíler permitem também melhorar o processo de hidratação do cimento, na medida em que facilitam a formação da estrutura cristalina da pasta de cimento endurecida.

Apesar de ser considerado um composto quimicamente inerte, por não manifestar reatividade de um modo significativo, existem autores, nomeadamente [47], a sugerir que a existência deste composto possa contribuir para o ataque do betão por sulfatos. O calcário é uma fonte de iões de carbonato, os quais, juntamente com outros compostos criam as condições necessárias à formação de taumasite provocando a deterioração do betão.

De acordo com [38] constataram que a adição de fíler calcário ao cimento provocou uma diminuição da sua resistência mecânica, especialmente após longos períodos de tempo, entre 28 a 360 dias. No entanto, de acordo com o mesmo estudo, a diminuição da resistência

mecânica após os 360 dias tem a mesma tendência da observada no cimento com adição de 20-30% de cinza volante.

3. AUTORREGENERAÇÃO

3.1. INTRODUÇÃO

A suscetibilidade dos revestimentos à fissuração durante o seu tempo de vida útil representa uma das maiores ameaças à sua durabilidade, dado que as fissuras criam um caminho direto para agentes nocivos acederem ao interior das estruturas. A reparação destes elementos, para além de morosa, apresenta custos elevados.

Nos últimos anos, tem-se observado o aumento da consciência ao nível mundial para o uso sustentável dos recursos naturais. Desta mentalidade nasce a necessidade de se obter eficiência a baixo custo e novas tecnologias que fomentem a sustentabilidade. É por este prisma que a ideia da autorregeneração associada à construção e à tecnologia dos materiais se torna tão atraente. A autorregeneração em materiais de base cimentícia, ou com outros ligantes como a cal, é um fenómeno que tem sido observado, mesmo que de modo heurístico, há cerca de dois séculos [48].

Um grupo de investigadores [49] analisou um conjunto de estruturas e edifícios antigos, de meados do século XVIII, onde foi possível observar um processo espontâneo de autorregeneração em diversas argamassas de cal e pozolana. A elevada quantidade de cal livre revelou ser uma condição essencial para a ocorrência de autorregeneração e, de um modo geral, este processo envolve a precipitação do carbonato de cálcio.

Este fenómeno foi observado em construções antigas dado estas possuírem uma elevada quantidade de cálcio comparativamente às construções mais recentes. A presença de componentes ou impurezas (orgânicas ou inorgânicas), humidade, temperatura ou pH influenciam também o processo de autorregeneração observado neste tipo de construções.

Com o intuito de esclarecer o conceito de autorregeneração, o relatório elaborado pelo comité técnico do RILEM [50] recorre a uma analogia usando a capacidade que a pele do ser humano possui de se reparar quando sofre um pequeno corte. Ou seja, quando se efetua um pequeno corte na pele este é “tratado” aplicando um adesivo; no entanto, tratar não é a função do adesivo, mas sim proteger o corte e permitir que a pele se regenere num ambiente mais controlado e com menos perturbações provenientes do meio. Este processo, ao qual se pode chamar de regeneração, apesar de ser também comum nos animais e em plantas, não se verifica ainda, de um modo geral, em materiais fabricados pelo Homem.

Quando ocorre um corte na pele, verifica-se que esta não resistiu à agressão, acabando por se rasgar. Considerando a engenharia dos materiais, a melhoria de um material é obtida geralmente através do aumento da sua força ou rigidez, de modo a que este suporte e resista a cargas mais elevadas. O facto de o diamante ser, provavelmente, o material mais forte de todos, deve-se aos pequenos átomos de carbono densamente compactados que fazem parte

da sua constituição. Assim, mesmo que a carga aplicada seja inferior à carga de rotura, esta pode, ou não, causar deformação plástica permanente devido à deslocação dos átomos que constituem o material. Este tipo de danos é formado durante a fase de uso, não podendo estes serem totalmente excluídos, o que implica a necessidade de inspeções periódicas para monitorizar o desenvolvimento de danos futuros. Para além do mais, qualquer dano que se observe vai implicar custos, mais cedo ou mais tarde. Ou seja, a criação de materiais mais resistentes baseia-se no desenvolvimento de microestruturas que evitem a criação ou aumento de microfissuras, o que por sua vez assenta numa filosofia de prevenção de danos. Esta filosofia forma a base de estudo dos materiais autorregenerantes pois assume que a formação de danos não é problemática, desde que seja contrariada por um processo subsequente de regeneração do respetivo dano. Isto significa que o dano pode ocorrer, e desenvolver-se, mas a quantidade de danos após determinado tempo deverá ser inferior à quantidade que existia anteriormente [51].

Atualmente já existem diversos estudos publicados no âmbito da autorregeneração, bem como casos práticos reais. Estes estudos aprofundam conhecimento relativamente a técnicas para proceder à fissuração do material e sua respetiva avaliação, variáveis que afetam a autorregeneração, bem como a análise de métodos que permitam caracterizar a autorregeneração do material. Os métodos utilizados para caracterizar a autorregeneração do material baseiam-se na quantificação da selagem das fissuras, a análise dos produtos regenerantes, e na avaliação da recuperação de propriedades mecânicas e ao nível da durabilidade.

Dentro dos casos práticos reais, a primeira aplicação de betão autorregenerante ocorreu em julho de 2014, no Equador. Foi construído um canal com sistema de irrigação (Figura 13), recorrendo a um betão autorregenerante com bactérias formadoras de esporos alcalifílicos e reforçado com fibras naturais.



Figura 13 - Processo de cofragem dos canais de irrigação no Equador: (a) preparação da solução; (b) preparação da cofragem; (c) secções do canal, uma com o betão autorregenerante e outra com betão de controlo [52]

Esta intervenção surge da necessidade de diminuir as perdas de água (cerca de 70%), por absorção e evaporação, que ocorriam no canal formado apenas por solo compactado e uma camada de betão. As fibras incorporadas tinham como função aumentar a resistência do betão à tração e controlar a largura das fissuras. Relativamente às bactérias, estas tinham como função selar as pequenas fissuras que se desenvolvessem.

Entre 2014 e 2015, recorreu-se a um sistema de reparação à base de bactérias numa garagem subterrânea localizada numa zona costeira dos Países Baixos. Essencialmente, este sistema recorre a um betão compatível com bactérias que produz minerais à base de calcite que diminuem a sua porosidade. [53] aplicaram o referido sistema no pavimento de um parque de estacionamento coberto, que mostravam sinais de fugas de água através de fissuras, e na rampa de acesso que mostrava degradação devido aos ciclos gelo/degelo ao qual esteve sujeita, conforme se observa na Figura 14.

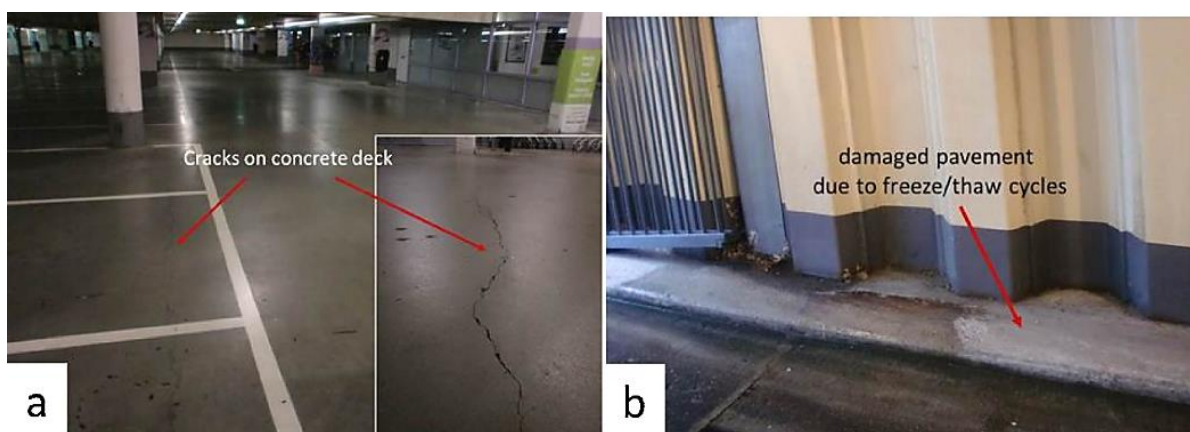


Figura 14 - Localização de aplicação do sistema de reparação à base de bactérias: (a) fissuras observadas no pavimento; (b) danos no pavimento por exposição à ação gelo/degelo [53]

No local, foi possível observar que as três fissuras de controlo (não tratadas) continuavam com fugas de água enquanto que das três fissuras tratadas, duas delas apenas mostravam pequenas fugas e na terceira não se observava quaisquer fugas [53]. Um outro caso prático, que recorreu ao uso de uma argamassa autorregenerante, deu-se nos Países Baixos, em outubro de 2015. Este procedimento teve como objetivo reparar uma fissura existente nas instalações de uma estação de tratamento de água, na qual se observaram fugas de água evidenciadas pela descoloração existente à superfície (Figura 15). Metade da fissura foi reparada com argamassa convencional e outra metade com argamassa à base de bactérias.

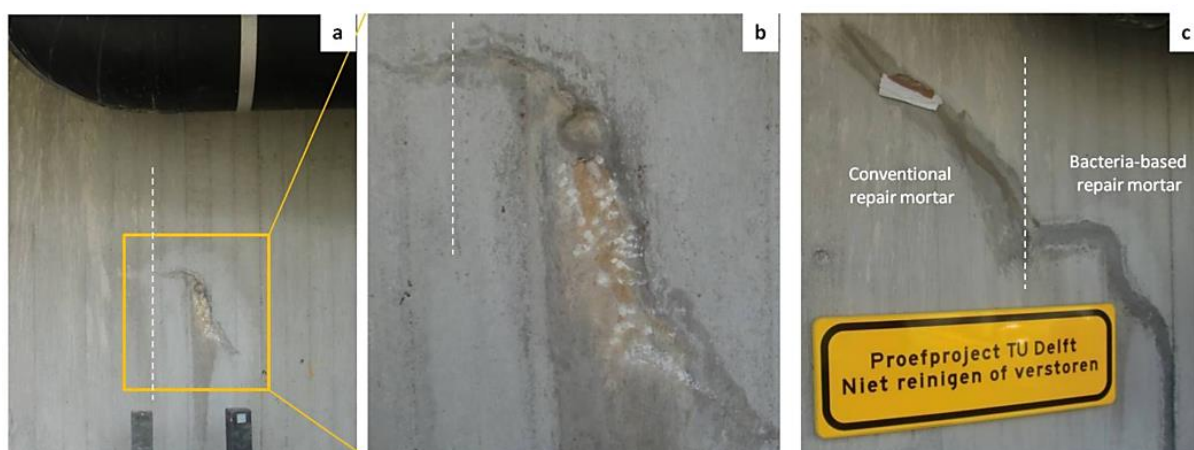


Figura 15 - Fissura na estação de tratamento de água antes da reparação: (a), (b) e (c) após a reparação com argamassa autorregenerante e com argamassa convencional [52]

Numa inspeção efetuada seis meses mais tarde, não se observou delaminação, nem fissuração, em nenhuma das argamassas.

Em 2015, aquando a construção do Groninger Forum, um centro cultural na cidade de Groninger (Holanda), descobriram-se manchas e infiltrações de água devido à existência de microfissuras nas paredes de diafragma da estrutura. Especula-se que as fissuras se tenham formado devido às elevadas pressões das águas subterrâneas, e posto isto, em colaboração com uma empresa de betão autorregenerante da Holanda, a Basilisk Concrete, foi decidido resolver o problema recorrendo à aplicação de uma argamassa autorregenerante para reparar e preencher as fissuras (Figura 16).



Figura 16 - Reparação das microfissuras nas paredes de diafragma no Groninger Forum [54]

Atualmente, as Universidades de Cardiff, Bath e Cambridge estão a desenvolver o projeto, *Materials for Life* (M4L) que tem como objetivo principal desenvolver materiais de construção e estruturas inovadoras que se monitorizam e autorregeneram diminuindo, ao mesmo tempo, os seus custos de manutenção.

3.2. DEFINIÇÕES E CONCEITOS

Nas últimas décadas, têm sido desenvolvidos diversos estudos no campo da autorregeneração, o que suscitou a necessidade de estabelecer definições e terminologia associada a este fenómeno.

Entre Abril de 2007 e Março de 2009, o comité técnico do *Japan Concrete Institute* (JCI TC-075B) intitulado de “Autogeneous healing in cementitious materials”, analisou diferentes estudos realizados até à data, relativos ao fenómeno de autorregeneração/reparação do betão, do qual resultou um relatório [55] publicado em 2009. Este relatório permitiu estabelecer as primeiras definições associadas ao fenómeno da autorregeneração e criou uma diferenciação entre os termos *healing* e *reparing* que correspondem a “regeneração” e “reparação”, respetivamente.

O termo “regeneração” é referido como o preenchimento das fissuras devido a um fenómeno convencional observado no betão, tal como re-hidratação do cimento ou o depósito (mineralização) de carbonato de cálcio, ou seja, as fissuras são preenchidas recorrendo a propriedades inatas ao material ou através da adição de materiais cimentícios complementares (e. g. adições) que têm como objetivo acelerar o mecanismo de preenchimento das fissuras.

Relativamente ao termo “reparação”, este refere-se ao preenchimento das fissuras devido à adição de um mecanismo artificial como substituto de reparação ou reforço convencional, ou seja, são adicionados mecanismos ou dispositivos fora da categoria das adições cimentícias convencionais (e.g. microcápsulas ou mecanismos geradores de calor), com o objetivo de gerar uma nova função, o preenchimento de fissuras [55].

Para além da distinção dos termos “regeneração” e “reparação” efetuada no relatório [55], distinguem-se também dois mecanismos diferentes, *inherent* ou *engineered* que correspondem a “inerente” ou “projetado”, respetivamente. Se o preenchimento das fissuras ocorre devido a fenómenos conhecidos, como a reidratação da cal do cimento, este constitui um mecanismo inerente, enquanto que quando ocorre através da adição de compostos químicos ou adições, constitui um mecanismo projetado. Ainda segundo o mesmo relatório, estabelecem-se três processos correspondentes à classificação do fenómeno de autorregeneração/reparação - estes processos encontram-se categorizados no diagrama de Venn da Figura 17. No diagrama são estabelecidos seis mecanismos e respetivas definições envolvidos no processo de recuperação do material - evento correspondente a toda a área do diagrama de Venn e em que se recupera pelo menos uma função do material compósito, independentemente do meio.

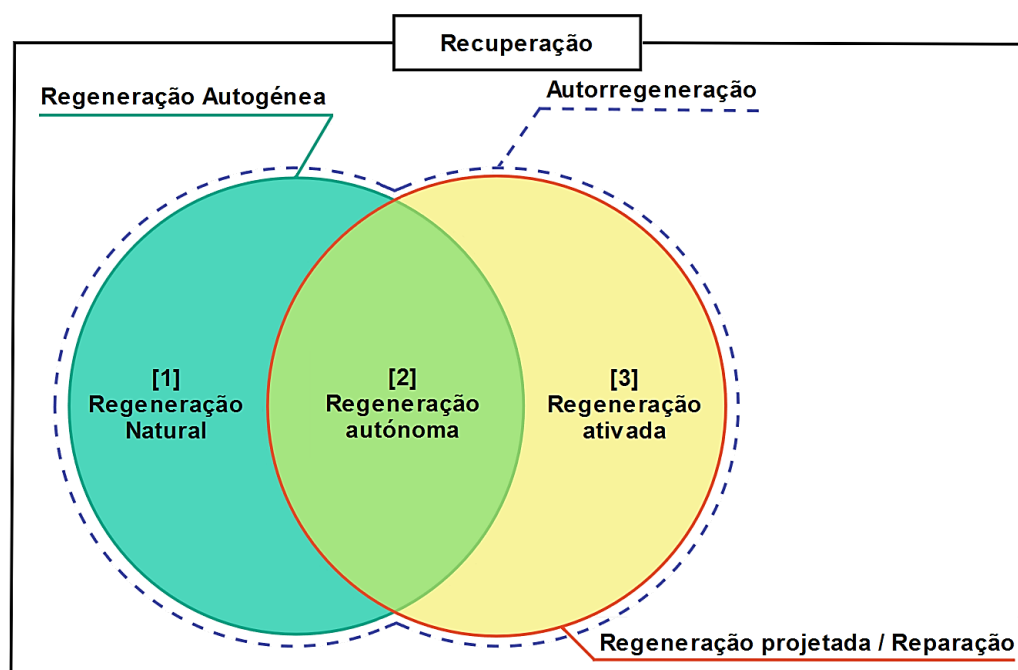


Figura 17 - Diagrama de Venn com a definição de autorregeneração no betão - Adaptado de: [55]

Conforme se observa no diagrama de Venn (Figura 17), obtido no relatório do TC-075B, de acordo com [55], os processos [1], [2] e [3] constituem todo o fenómeno associado ao preenchimento das fissuras nos materiais compósitos, sem intervenção direta da mão humana. São estes:

- Regeneração natural (*Natural healing*) [1] – Consiste num fenómeno em que as fissuras nos diferentes materiais compósitos são naturalmente preenchidas num ambiente envolvendo humidade, sem proceder a qualquer alteração na sua composição;
- Regeneração autónoma (*Autonomic healing*) [2] – Este processo ocorre em materiais compósitos de composição específica, ou seja, recorrendo ao uso de adições com o objetivo de preencher as fissuras ou acelerar o preenchimento das mesmas;
- Regeneração ativada (*Activated healing*) [3] – o preenchimento das fissuras ocorre através de mecanismos incorporados de antemão nos materiais compósitos com o propósito de reparar o mesmo de forma autónoma.

Por outro lado, em 2013, a RILEM (*Reunion Internationale des Laboratoires et Experts des Materiaux*), após uma análise das conclusões retiradas do comité técnico 221-SHC realizado entre 2005 e 2013, propôs clarificar e simplificar as diferentes definições associadas ao fenómeno de autorregeneração. Considerando também as definições estabelecidas anteriormente pelo comité TC-075B, a RILEM estabelece dois processos de autorregeneração, autógena e autónoma, associados a duas ações: *Self-closing* e *Self-healing* (Tabela 8).

Tabela 8 - Definição de betão autorregenerante com base na ação e processo definidos pela RILEM-TC221 - Adaptado de: [51]

		Ação	
		Autorreparação	Autorregeneração
Processo	Autógeno	Autorreparação autógena	Autorregeneração autógena
	Autónomo	Autorreparação autónoma	Autorregeneração autónoma

O primeiro processo, autógeno, ocorre quando o processo de recuperação (*recovery*) do material ocorre a partir dos componentes que estão presentes na sua constituição base, ou seja, que pertencem ao material. O segundo processo, autónomo, ocorre quando o processo de recuperação (*recovery*) do material se dá pela ação de componentes que não lhe são inerentes, ou conforme se refere no relatório, adições ou componentes não passíveis de se encontrar no material. Quanto ao resultado da ação, esta é distinguida por *self-closing* quando o próprio material repara as suas fissuras ou *self-healing* quando o próprio material recupera as suas propriedades após reparação das suas fissuras.

É possível constatar que a RILEM foca as suas classificações no que despoleta o mecanismo de autorregeneração e não ao tipo de mecanismo em si, conforme se constata nas definições iniciais obtidas através do JCI.

Por outro lado, [56] decidiram resumir, de grosso modo, as definições estabelecidas em estudos anteriores, dividindo-as em dois grupos essenciais, *self-healing* e *self-repairing* que correspondem a autorregeneração e autorreparação, respetivamente.

Tabela 9 - Definição de betão autorregenerante com base na ação e processo pelo RILEM-TC221 - Adaptado de: [51]

Autorregeneração	Autorregeneração natural
	Autorregeneração desenvolvida
Autorreparação	Autorreparação passiva
	Autorreparação ativa

O primeiro grupo, autorregeneração, foca-se na capacidade potencial do betão, ou de compósitos de cimento, de preencher as fissuras por si só ou através de tecnologias projetadas com o objetivo de estimular essa capacidade. Assim sendo, este primeiro grupo pode dividir-se em duas categorias conforme o processo de autorregeneração se dá naturalmente, ou seja, com mecanismos inerentes ao material – autorregeneração natural

(*natural self-healing*) - ou recorrendo à instalação de mecanismos desenvolvidos com o intuito de estimular esse processo – autorregeneração desenvolvida (*engineered self-healing*).

O segundo grupo é um género de suplemento à função de reparação de fissuras, através de uma prévia incorporação de dispositivos com esse mesmo propósito – autorreparação. Este segundo grupo divide-se também em duas categorias, quer o processo ocorra de modo passivo, recorrendo a elementos funcionais que ao longo do tempo vão executando a sua função – autorreparação passiva (*passive self-repairing*); ou quando as fissuras são monitorizadas através de um sensor e reparadas, a partir do momento em que a sua largura ultrapasse um valor crítico – autorreparação ativa (*active self-repairing*).

É possível constatar que estas últimas definições já remetem para diferentes níveis de desempenho dos materiais, na medida em que estes adquirem a capacidade de se autorreparar quer de um modo passivo, ou seja, reagindo a um estímulo externo e sem intervenção humana, quer de um modo ativo em que requer intervenção de modo a que se dê o processo de reparação.

Atualmente, a nível internacional, concordou-se em usar os termos autógeno e autónomo para descrever o processo de autorregeneração. O resultado deste processo distingue a selagem das fissuras da autorregeneração das fissuras. Uma autorregeneração das fissuras implica a recuperação das propriedades do material como consequência da selagem da fissura [1].

3.3. MECANISMOS DE AUTORREGENERAÇÃO

Diferentes investigações reconheceram diversos mecanismos de autorregeneração de materiais cimentícios, sendo que apenas alguns são permanentes. O desempenho de um mecanismo vai depender de vários fatores e estes variam conforme o tipo de mecanismo.

Conforme referido no subcapítulo 3.2, é possível dividir a capacidade de autorregeneração em três processos: natural, autónoma e ativada.

No entanto, conforme mencionado por [1] concordou-se em usar os termos autógeno e autónomo para descrever o processo de autorregeneração. Através desta simplificação, atribui-se a cada um dos mecanismos diversos exemplos, conforme se observa na Tabela 10. Estes mecanismos são ainda classificados de acordo com a sua evolução: potencial, quando a autorregeneração ocorre recorrendo apenas aos compostos de base do material ou desenvolvida, quando se adicionam mecanismos ou componentes que incentivam ou despoletam esta ação.

Tabela 10 - Exemplos de mecanismos para cada processo de autorregeneração - Adaptado de [55], [51] e [1]

Terminologia	Exemplos	Evolução dos mecanismos
Regeneração natural ou autógena (<i>Natural/autogenous healing</i>)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Hidratação do cimento residual; ▪ Carbonatação/precipitação dos produtos de reação. 	Potencial
Regeneração autônoma (<i>Autonomic healing</i>)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Reação pozolânica da cinza volante; ▪ Polímeros superabsorventes (PSA); ▪ Bactérias; ▪ Encapsulação e sistemas vasculares; ▪ Calor de hidratação proveniente de dispositivos exteriores. 	Desenvolvido

3.3.1. REGENERAÇÃO NATURAL OU AUTÓGENA

Conforme já foi abordado no capítulo 3.2, a regeneração natural dá-se recorrendo aos compostos naturalmente existentes na mistura, ou seja, que lhe são inerentes [51]. Na Tabela 10 são dados como exemplo deste fenómeno a hidratação do cimento residual e a carbonatação ou precipitação dos produtos de reação. Quanto à evolução do seu mecanismo, este assume-se como potencial, ou seja, esta capacidade de autorregeneração acaba por ser inerente ao material, na medida em que o agente responsável pelo processo de regeneração se encontra naturalmente no material, sem qualquer tipo de adição.

De acordo com os autores [51], a hidratação do cimento residual e a carbonatação ou precipitação dos produtos de reação enquadram-se no conceito de autorregeneração autógena. Os mesmos estabelecem que este fenómeno de autorregeneração ocorre, essencialmente, através de três processos: físicos, químicos ou mecânicos. Estes processos, esquematizados na Figura 18, podem contribuir para uma autorregeneração autógena da fissura, quando exposta a água.

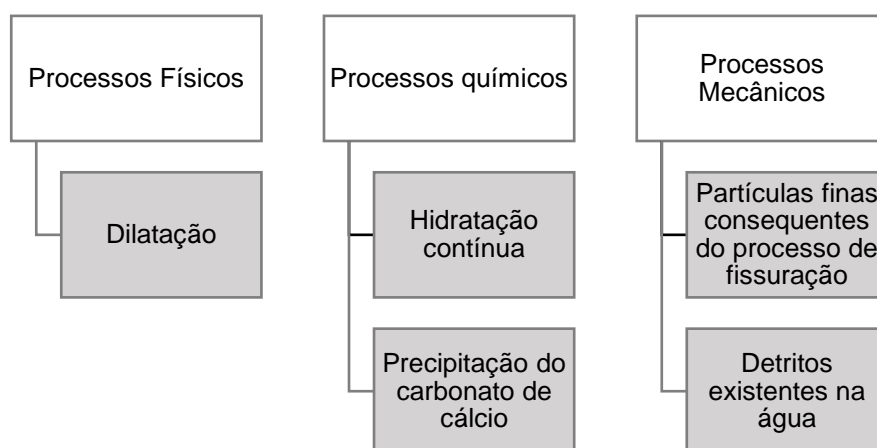


Figura 18 - Principais mecanismos associados à autorregeneração autóloga em materiais cimentícios – Adaptado de: [51]

Os processos físicos ocorrem através da dilatação do material cimentício no interior da fissura, devido à absorção de água pelos silicatos de cálcio hidratado. Quanto aos processos mecânicos, estes podem estar associados a um bloqueio da fissura, seja por detritos ou partículas finas de cimento consequentes do processo de fissuração ou impurezas existentes na própria água [57]. Já os processos químicos, como a hidratação contínua ou a precipitação do carbonato de cálcio, adquirem uma maior complexidade, principalmente no que toca às reações envolvidas.

A hidratação contínua do cimento, que não tinha ocorrido anteriormente por falta de água, é despoletada aquando a exposição à mesma. Ao se formarem novos produtos de reação (que ocupam cerca do dobro do espaço do grão de cimento original), este vão preencher a fissura. Este fenómeno pode não ser suficiente para que ocorra a autorregeneração, mas quando ocorre em simultâneo com outros mecanismos, como a dilatação, pode ser suficiente para autorregenerar pequenas fissuras com larguras de cerca de 0,1 milímetros [51].

A adição de cinza volante geralmente vai promover e favorecer o mecanismo de regeneração autóloga, nomeadamente a hidratação contínua, dado que parte da cinza volante adicionada ao material cimentício vai permanecer por hidratar até idades tardias [57]. Este exemplo de mecanismo é devidamente aprofundado no capítulo 3.4.1.

A precipitação do carbonato de cálcio, como processo químico que contribui para a regeneração de fissuras, vai depender de diversos fatores como o pH, temperatura e concentração dos reagentes. Os iões de cálcio provenientes da água existente nos poros do material cimentício (Ca^{2+}), vão reagir com os iões de carbonato da água existente na fissura e combinado com CaCO_3 precipita no interior da mesma preenchendo-a [44].

De acordo com [58] a hidratação contínua é mais evidente nos primeiros tempos, dado que existe uma maior quantidade de cimento por hidratar; já a precipitação do carbonato de cálcio

ocorre mais tarde, tornando-se assim o mecanismo químico de autorregeneração autógena mais relevante.

Vários autores constataram que a autorregeneração autógena em materiais compósitos apenas é eficaz em fissuras de espessura reduzida. Os valores máximos de largura de fissuras regeneradas por este tipo de mecanismos estão entre os 200 e os 300 micrómetros [59] [60]. Face a esta desvantagem, têm sido estudados diversos métodos para controlar a largura das fissuras como, por exemplo, o uso de fibras, sendo que as fibras sintéticas de alta polaridade apresentaram melhores resultados [61]. Outro método que obteve bons resultados consiste na aplicação de forças compressivas para melhorar o contacto entre as faces e diminuir a largura da fissura, facilitando assim a autorregeneração autógena [62].

3.3.2. REGENERAÇÃO AUTÓNOMA OU ATIVADA

Conforme já foi abordado no capítulo 3.2, a regeneração autónoma consiste num processo onde a recuperação se deve a componentes que são adicionados, ou seja, que de outra maneira não seriam encontrados no material [51]. Ou seja, a regeneração da fissura é impulsionada por mecanismos desencadeados de um modo artificial através da adição de agentes externos. De acordo com [57] é possível reparar fissuras com maior espessura, recorrendo a um mecanismo autónomo comparativamente a um mecanismo autógeno. Por exemplo, através de mecanismos autógenos foi possível a regeneração de uma fissura com cerca de 970 micrómetros através de materiais compósitos cimentícios com microcápsulas contendo bactérias [63].

O uso de polímeros superabsorventes como mecanismo de autorregeneração é aplicado, essencialmente, em materiais cimentícios com baixa relação água/ligante com o intuito de diminuir a fissuração por retração durante o endurecimento do material. Para além da capacidade de autorregeneração de fissuras, constatou-se que o emprego deste mecanismo permite também aumentar a resistência aos ciclos de gelo/degelo [57]

Têm sido elaborados diversos estudos, relativos ao uso de bactérias, de modo a estimular o mecanismo de autorregeneração em materiais cimentícios. Neste mecanismo, as bactérias, ao produzir esporos e associadas a um elemento precursor, vão promover uma reação química que irá produzir carbonato de cálcio que surgirá em forma de calcite ou aragonite, acabando por selar as fissuras [64]. Para além da selagem das fissuras, o uso de bactérias revelou ter o potencial de melhorar a resistência mecânica de uma argamassa de cimento [65]. A precipitação do carbonato de cálcio pelas bactérias consiste num mecanismo complexo que vai depender de vários fatores como a concentração de bactérias, a força iónica e o nível de pH [66]. [66] através de um estudo experimental, elaboraram uma argamassa com cimento de Portland onde adicionaram bactérias (*Bacillus subtilis*), acetato de cálcio e cinza volante. Deste estudo foi possível observar um aumento na resistência à compressão e um limite de regeneração efetiva da fissura, para uma espessura máxima de 0,22 milímetros.

A encapsulação consiste em envolver partículas, sejam estas sólidas, líquidas ou gases num involucro protegendo-as e isolando-as do meio envolvente. Na autorregeneração assume-se que, aquando a ocorrência de fissura, a cápsula rompe libertando o agente regenerante contido no seu interior, selando a fissura. Uma das desvantagens do uso de cápsulas é o facto de estas necessitarem de ter alguma fragilidade de modo a facilitar a libertação do agente autorregenerante aquando da fissuração, sendo que esta fragilidade pode dificultar a moldagem dos provetes [50].

Existem também sistemas que funcionam de um modo mais complexo ao recorrer a um mecanismo com um sensor que ativa uma libertação controlada do agente responsável pela selagem da fissura. São exemplo os sistemas vasculares, que consistem numa rede de tubos ocos contendo o agente autorregenerante embebidos na matriz do cimento [67].

Uma das desvantagens dos mecanismos de regeneração autónoma (não ativada) prende-se com o facto de o agente regenerado estar disperso pela matriz, e só ocorrer autorregeneração quando este entra em contacto com a fissura. Nesta situação, torna-se vantajoso usar dispositivos ou impulsos externos que ativem o mecanismo de autorregeneração (autorregeneração ativada). Um exemplo é a aplicação de calor através de um dispositivo externo que possui diversas desvantagens como o aumento do custo, necessidade de inspeções para saber quando e onde as fissuras ocorrem. Esta última é uma questão que foi resolvida através da abordagem sugerida por pelos autores Nishiwaki T., Mihashi H., e Jang B. et al. [68] que consiste no fornecimento de corrente elétrica permanente. No entanto, os mesmos autores referem que apesar desta abordagem excluir a inconveniência das inspeções, questões como o custo do sistema e o perigo de sobreaquecimento permanecem por resolver.

3.4. ADIÇÕES

A durabilidade de compósito de matriz cimentícia está geralmente associada a uma matriz de cimento densa, compacta e da qual se pode esperar uma menor permeabilidade, dificultando assim o acesso dos agentes corrosivos no interior do elemento. A densidade e compacidade do material cimentício é, em parte, assegurada através de uma adequada distribuição de partículas, que pode ser obtida através do uso de aditivos minerais como cinza volante ou fíler calcário.

O aumento da densidade e compacidade do material, com consequente redução da porosidade, vai permitir que fique uma porção de cimento por hidratar ao longo do tempo, e de acordo com as definições estabelecidas pelo JCI e o RILEM, quando uma porção do cimento fica por hidratar, ocorrendo uma hidratação continua ao longo do tempo, este mecanismo constitui uma reparação autógena do material.

3.4.1. CINZA VOLANTE

A cinza volante tem sido bastante usada como adição nas últimas décadas e existem indícios de que possui uma certa capacidade de autorregeneração quando na presença de hidróxido de cálcio [69]. Dá-se então, um preenchimento das microfissuras com os produtos hidratados da cinza volante e do cimento, diminuindo a transferência de substâncias nocivas para o interior e permitindo, assim, que a estrutura alcance uma maior vida útil [69]. A utilização de cinza volante como adição provoca também um refinamento da sua estrutura porosa (diminuindo a porosidade e permeabilidade), aumentando a resistência da estrutura a ataques químicos e mais precisamente a ataques por sulfatos.

Os autores Na S., Hama Y., e Taniguchi M. et al. [69] publicaram um trabalho científico, com o objetivo de estudar a taxa de hidratação numa pasta de cimento e a capacidade de autorregeneração, a longo prazo, de uma argamassa incorporando cinza volante. De modo a testar a capacidade de autorregeneração, foram efetuadas 10 misturas com diferentes tipos de cimento, cinza volante, percentagens de substituição, relação água/cimento e condições de cura. Das diversas conclusões retiradas pelos autores [69] vale a pena referir os seguintes pontos:

- A incorporação de cinza volante na pasta de cimento afeta a taxa de hidratação e o consumo de hidróxido de cálcio. Devido à sua reação pozolânica, nas amostras com cinza volante, o conteúdo restante de hidróxido de cálcio diminuiu em apenas dois dias, comparativamente às amostras de controlo, sem cinza volante. As amostras com substituição de cerca de 30% de cinza volante e elevadas temperaturas de cura obtiveram menores quantidades restantes de hidróxido de cálcio comparativamente às amostras com menores percentagens de substituição. Ou seja, nas primeiras deu-se um consumo mais elevado deste composto proveniente do cimento. Os autores concluíram que este comportamento se deve à reação pozolânica da cinza volante que aumenta conforme o aumento da percentagem de substituição e da temperatura de cura.
- A reação pozolânica da cinza volante mostrou, também, aumentar a resistência à carbonatação. A possível continuação desta reação, mesmo após a total hidratação do cimento, permite que as microfissuras sejam preenchidas pelos produtos de hidratação da cinza volante, conferindo assim uma maior resistência à carbonatação.
- A relação água/cimento parece afetar a capacidade de autorregeneração. Uma menor relação A/C poderá originar fissuras de menor volume e menor porosidade, que são mais facilmente seladas pelos produtos de hidratação do cimento e da cinza volante.
- Os autores concluem que para assegurar uma boa capacidade de autorregeneração a substituição do ligante por cinza volante deverá ser de 10% a 15% e de 11% a 20% para relações de água/cimento 0,50 a 0,55 e 0,55 a 0,60, respetivamente.

Outros autores [70] realizaram um estudo experimental com o objetivo de investigar a autorregeneração autogénica. Recorreram à elaboração de provetes cúbicos de argamassa cimentícia com diferentes percentagens de substituição de cimento por cinza volante.

Foi usado cimento de Portland comum, cinza volante, areia do rio com módulo de finura de 2,65 e água potável. A relação de água/ligante foi de 0,50 e a relação de agregado/ligante foi constante e de 3:1. Das diversas conclusões retiradas por [70] vale a pena referir os seguintes pontos:

- A adição de 20% de cinza volante não afetou a resistência dos provetes à compressão aos 28 dias e, ao mesmo tempo, nestes provetes observou-se uma maior absorção de água.
- O valor da velocidade de ultrassons não mostrou variações significativas.
- A aplicação de cargas de compressão provocou a deterioração dos provetes de argamassa.
- A autorregeneração em termos de resistência à compressão, propriedades físicas e permeabilidade verificou-se mais em argamassas com 20% de cinza volante curadas em água normal do que ao ar;
- Através de uma análise microscópica confirmou-se a deposição de calcite na abertura da fissura tornando o compósito de cimentício menos permeável e mais compacto;
- Com a adição de cinza volante em compósitos cimentícios, estes adquirem uma capacidade de regeneração autógena mais elevada quando comparados com os provetes de argamassa de referência, sem adições.

3.4.2. FÍLER CALCÁRIO

Não existem muitos estudos que associem o efeito de autorregeneração a materiais cimentícios com adição de fíler calcário. Jaroenratanapirom D. e Sahamitmongkol R. [71] analisaram a capacidade de autorregeneração de uma argamassa com adição de 10% de fíler calcário. A largura das fissuras e respetiva selagem foi observada através de um microscópio digital, através do qual se constatou que o espécime de argamassa com 10% de fíler calcário obteve uma selagem completa aos 12 dias, em fissuras com espessura inferior a 0,1 milímetros e uma diminuição de 0,29 milímetros (espessura inicial) para 0,12 milímetros (aos 44 dias) em fissuras com mais de 0,25 milímetros.

No capítulo 2.2.4.2 são enumeradas diversas vantagens, associadas à adição de fíler calcário nos materiais cimentícios como inerte. No entanto, há autores [72] que defendem que o fíler calcário pode interagir quimicamente com os compostos do cimento, melhorando as suas propriedades. Ainda de acordo com [72], a adição de fíler calcário ao cimento vai acelerar o seu processo de hidratação, mais precisamente a fase C_3S , agindo com um núcleo para a precipitação de CH e C-S-H devido à presença do carbonato de cálcio ($CaCO_3$) na sua

composição. Esta aceleração pode conduzir a resistências à compressão mais elevadas nas primeiras idades e a tempos de cura inferiores.

Colocando como hipótese a possibilidade de o fíler de calcário não agir apenas como um composto inerte, uma vez que este deriva da moagem fina de calcário, torna-se interessante refletir sobre a cal. A cal, sendo obtida através da decomposição térmica do calcário, tem mostrado também, evidências bastante favoráveis no campo da autorregeneração. Esta, como ligante, tem sido usada na construção por milhares de anos. Existem indícios, encontrados na Palestina e na Turquia datadas aproximadamente de 12 000 anos a.C. [73].

O processo de autorregeneração de uma argamassa de cal consiste num processo de dissolução, transporte e reprecipitação dos compostos de cálcio que acabam por reparar as fissuras. Os autores Lubelli B., Nijland T. e Hees R. [49] compilaram uma análise a vários casos em alvenarias centenárias, em que se verificaram fenómenos de autorregeneração em argamassas de cal aérea, cal hidráulica e à base de cal aérea adicionada de pozolana. Das diversas conclusões retiradas vale a pena destacar as seguintes:

- É necessária uma quantidade considerável de cal livre para que ocorra a autorregeneração, sendo que a quantidade produzida pela hidratação do clínquer do cimento de Portland não é suficiente.
- Para que ocorra a autorregeneração é necessária uma quantidade elevada de humidade no elemento. Devido à baixa solubilidade dos compostos de cálcio, estes necessitam de água para que ocorra a sua dissolução e transporte para a fissura.
- Por outro lado, são também necessários períodos de secagem dado que estes melhoram a reprecipitação dos compostos de cálcio nas fissuras e, ao mesmo tempo, permitem a carbonatação da portlandite.

3.5. AVALIAÇÃO DO EFEITO DE AUTORREGENERAÇÃO

Após elucidar, nos capítulos anteriores, as diferentes definições, conceitos e mecanismos associados à autorregeneração dos materiais cimentícios, torna-se importante identificar quais os procedimentos/técnicas que permitem fazer a avaliação deste fenómeno. Neste capítulo são, então, abordadas diferentes técnicas e mecanismos que permitem avaliar o efeito de autorregeneração.

De modo a fazer uma avaliação do efeito de autorregeneração, seja este autónomo ou autógeno, torna-se necessário provocar dano no material. Apenas provocando dano num material cimentício se consegue avaliar a sua capacidade de autorregeneração.

Após danificar o espécime, é feita uma análise ao longo do tempo de modo a verificar se ocorre uma recuperação das suas propriedades mecânicas. De seguida, é importante comparar os resultados obtidos entre o espécime danificado e o espécime de referência, ou seja, não danificado e sujeito às mesmas condições de cura.

De um modo geral, o dano (fissuras) são induzidas recorrendo à aplicação de cargas, sendo que em estudos no campo da autorregeneração, estas têm sido induzidas essencialmente através de processos mecânicos [1], nomeadamente:

- ensaios à flexão (em 3 ou 4 pontos) com ou sem recurso a entalhes nos provetes;
- ensaios de tração direta;
- ensaios de rotura por tração;
- ensaios à compressão.

Ainda que menos usados, existem outros métodos para provocar fissuras no material. Um desses exemplos recorre ao uso de deformações associadas ao fenómeno de retração durante a secagem, e outro exemplo são os danos provocados pelos ciclos gelo/degelo [1].

Mukherjee S., Mandal S., e Mohanta S. et al. [70] optaram por infligir dano em provetes cúbicos, aplicando uma carga à compressão (50% da tensão de rotura), aos 28 dias.

Existem estudos [74] que comprovam que a resistência à compressão em provetes prismáticos é inferior à registada em provetes cúbicos. Ou seja, a resistência de um material cimentício diminui com o aumento da esbelteza dos provetes [75].

Conforme mencionado anteriormente, a resistência à compressão diminui à medida que o tamanho do provete aumenta e, este fenómeno é intitulado de fenómeno de redução e baseia-se na Modified Size Effect Law (MSEL), que pode ser traduzida por lei modificada do efeito de tamanho [76]. Aquando a aplicação de uma força à compressão, nos provetes cúbicos esta fica concentrada nas arestas do provete, enquanto que num provete prismático dá-se, adicionalmente, este efeito que, pode ser também intitulado de efeito de comprimento ou esbelteza [77].

Relativamente aos ensaios que permitem avaliar a autorregeneração nos materiais, estes podem dividir-se em duas categorias principais: ensaios baseados na recuperação das propriedades de durabilidade e os ensaios baseados na recuperação das propriedades mecânicas [1].

Na recuperação das propriedades de durabilidade é avaliada a permeabilidade do material à água, e outros agentes externos, através das fissuras. Assim, estão incluídos os ensaios de permeabilidade, absorção de água e resistência à penetração de cloretos [1]. O ensaio da permeabilidade permite avaliar a facilidade com que o fluxo de água atravessa as fissuras, enquanto que o ensaio de absorção de água permite avaliar a facilidade com que uma argamassa absorve água por absorção capilar.

Na recuperação das propriedades mecânicas, o foco é dado na avaliação do comportamento estrutural da argamassa. Para fazer esta avaliação recorre-se à medição da velocidade de ultrassons através do provete e a ensaios mecânicos, como são exemplo o de resistência à compressão e à tração por flexão.

No caso do ensaio da velocidade de propagação de ultrassons, este vai permitir detetar e caracterizar irregularidades existentes no interior do provete, auxiliando assim, na avaliação da autorregeneração do material cimentício. De acordo com [78] as ondas ultrassónicas propagam-se mais rapidamente no betão (4-5 km/s) do que na água (1,48 km/s) ou no ar (0,35 km/s). Na presença de fissura, o tempo de propagação da onda aumenta, pois esta terá que contornar a fissura. Depois, à medida que a fissura vai selando, o tempo de propagação da onda vai gradualmente diminuindo porque as ondas passam a atravessar a fissura devidamente selada. Este comportamento é coerente as conclusões retiradas por [79] que ao estimar a porosidade da pasta de cimento em função da velocidade dos ultrassons, observou que se dá uma diminuição em função do aumento da relação água/ligante que consequentemente origina estruturas mais porosas. Estas conclusões vão de encontro ao que foi mencionado anteriormente, ou seja, que a velocidade de propagação dos ultrassons é mais baixa no ar (0,35 km/s) do que num material cimentício como o betão (4-5 km/s).

Um dos grandes desafios é, no entanto, conseguir distinguir autorregeneração de hidratação contínua. Os autores [1] observaram estudos que sugerem que o fechamento da fissura é o primeiro passo preliminar antes de se atingir qualquer recuperação de propriedades mecânicas ou de durabilidade e, desse modo, considerar apenas o fechamento da fissura como indicador de regeneração pode levar a sobrestimar a capacidade de autorregeneração de um material. É com base neste ponto de vista que se torna interessante a medição da velocidade de propagação de ultrassons pois possibilita avaliar a existência de fissuras no interior do provete e, uma vez que é um ensaio não destrutivo, possibilita também efetuar uma monitorização.

4. CAMPANHA LABORATORIAL

4.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

Na presente dissertação realizou-se uma campanha experimental, com o intuito de avaliar o efeito de adições na autorregeneração de argamassas cimentícias, na qual se procedeu à elaboração de um conjunto de representativo de 5 grupos de argamassas, nomeadamente:

- argamassa de cimento de referência (sem qualquer tipo de substituição) – REF;
- argamassa semelhante, mas com substituição parcial de cimento por 15% de fíler calcário – FC15;
- idem, mas com substituição parcial de cimento por 30% de fíler calcário – FC30;
- idem, mas com substituição parcial de cimento por 15% de cinza volante – CV15;
- idem, mas com substituição parcial de cimento por 30% de cinza volante – CV30.

A preparação das argamassas incidiu, sempre que possível, nos procedimentos estabelecidos pelas normas EN 1015-2/A1:1998/2006 [80] e NP EN 196-1:2005 [81].

No presente capítulo são apresentadas as diferentes composições das argamassas produzidas, bem como o seu processo de fabrico e respetiva elaboração dos provetes a ensaiar. É ainda elaborado um plano de ensaios em 4.5, onde se estabelece uma sequência distinta de atividades realizadas em laboratório, com o intuito de caracterizar as diferentes composições de argamassa elaboradas.

De modo a avaliar o efeito de autorregeneração, é necessário fazer uma comparação entre um provete danificado e um provete não danificado. Os provetes danificados foram obtidos recorrendo à aplicação de uma carga à compressão de 60% a carga de rotura ensaiada previamente.

Como uma das grandes dificuldades é distinguir autorregeneração de hidratação contínua, optou-se por ter um provete de referência, sem dano, para qualquer uma das argamassas e ensaios que serão efetuados. Deste modo, é possível comparar ambos os provetes e correlacionar os dados obtidos nos diversos ensaios, visto que, a única variável para cada tipo de argamassa será a existência, ou não, de dano no provete.

A capacidade de autorregeneração do material cimentício foi avaliada com recurso a ensaios que permitem verificar, indiretamente, a selagem das microfissuras que compreendem o dano provocado e a recuperação das propriedades mecânicas do espécime. Assim sendo, estes ensaios foram feitos em dois tipos de provetes, um danificado e um não danificado (de controlo) sob as mesmas condições de cura, aos 28 e aos 120 dias de idade.

Uma vez que se teve a intenção de monitorizar a autorregeneração através da medição da velocidade de propagação de ultrassons, desde a idade em que foi provocado o dano até aos 120 dias, foi necessário avaliar a influência da humidade nas velocidades de ultrassons obtidas.

No ensaio da velocidade de propagação de ultrassons, para cada provete, danificado e não danificado, submeteram-se estes a diferentes condições aquando da altura do ensaio – húmido ou seco. A diferença entre os provetes ensaiados em estado húmido e os provetes ensaiados no estado seco é que estes últimos, antes do ensaio, foram colocados na estufa.

Assim, dentro de cada um dos grupos referidos anteriormente e para o ensaio da velocidade de propagação dos ultrassons, inserem-se ainda quatro novas vertentes, nomeadamente:

- provete seco não danificado;
- provete seco danificado;
- provete húmido danificado;
- provete húmido não danificado.

Ao ensaiar um provete húmido e um provete previamente seco em estufa, pretende-se perceber de que modo a presença de água vai afetar o desenvolvimento do material durante a monitorização.

4.2. DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS

A dosagem de uma argamassa varia conforme o uso pretendido e requer a determinação das proporções dos diferentes componentes que a constituem. Na designação de uma argamassa pode constar apenas o peso de ligante, expresso em quilogramas, necessário para um metro cúbico de agregado. A dosagem de uma argamassa pode também ser definida pelo traço, em massa ou em volume, que permite identificar a quantidade dos diferentes materiais sólidos que constituem a argamassa. Por exemplo, uma argamassa de traço volumétrico 1:2 possui um volume aparente de ligante e dois volumes aparentes iguais de areia.

4.2.1. CIMENTO PORTLAND

O cimento utilizado na elaboração dos provetes foi o Cimento Portland CEM II/BL 32,5 N (Figura 19), segundo a EN 197-1:2012 [32], fornecido pela SECIL.



Figura 19 – Cimento Portland CEM II/B-L 32,5 N

Este cimento tem na sua constituição 65% a 79% de clínquer Portland; 21% a 35% de calcário; e 0% a 5% de outros constituintes [82].

Segundo a ficha técnica do cimento Portland [82], fornecida pela SECIL, obtém-se os dados referentes às suas características físicas, químicas e mecânicas que constam nas Tabela 11, Tabela 12 e Tabela 13, respetivamente.

Tabela 11 – Propriedades físicas do cimento Portland – CEM II/B-L 32,5 [82]

Propriedades	Método de Ensaio	Valor Especificado
Princípio de Presa	NP EN 196-3	≥ 75 min
Expansibilidade	(2005)	≤ 10 mm

Tabela 12 - Propriedades químicas do cimento Portland – CEM II/B-L 32,5 [82]

Propriedades	Método de Ensaio	Valor Especificado
Teor de Sulfatos (em SO_3)	NP EN 196-2 (2005)	$\leq 3,5\%$ (1)
Teor de Cloretos	NP EN 196-21 (2005)	$\leq 0,10\%$ (1)
(1) As percentagens referem-se à massa de cimento.		

Tabela 13 - Propriedades mecânicas do cimento Portland – CEM II/B-L 32,5 [82]

Resistência à Compressão [MPa]			
Resistência aos primeiros dias		Resistência de referência	NP EN 196-1 (2005)
2 dias	7 dias	28 dias	
-	≥ 16	$\geq 32,5$ e $\leq 52,5$	

A escolha do ligante teve diversos fatores em conta, nomeadamente, a sua resistência, trabalhabilidade, tempo disponível de utilização antes do início da presa e custo, face a outros tipos de cimento comercializados. A opção pelo estudo de argamassas de cimento prende-se pelo tempo de presa, significativamente mais rápido que o das argamassas de cal aérea, móbil da utilização indiscriminada deste ligante na construção contemporânea e mesmo em operações de reabilitação efetuadas nas últimas décadas.

4.2.2. AGREGADO

Usou-se uma mistura de dois tipos de areias, de granulometrias 0/2 e 0/4 num traço volumétrico de 1:2, respetivamente. Estudos demonstram que uma areia composta por grãos finos e grãos grossos (na proporção de 1/3 e 2/3, respetivamente) apresenta menor volume de vazios.

A areia 0/2 (Figura 20) é proveniente da Herdade da Mesquita, em Sesimbra, e fornecida pelo Grupo Soarvamil. De acordo com o fornecedor esta areia é constituída por quartzo, quartzito e feldspato [83].



Figura 20 – Areia fina 0/2

A areia de maior dimensão 0/4 (Figura 21), é proveniente do Pinhal Conde Cunha 4, no Seixal. De acordo com o fornecedor (Grupo Soarvamil) esta areia para além de ter quartzo, quartzito e feldspato na sua constituição, incorpora também moscovite [36].



Figura 21 – Areia grossa 0/4

As areias utilizadas foram devidamente caracterizadas por peneiração, quanto à dimensão e distribuição granulométrica das partículas, e para tal foi utilizada a metodologia descrita na norma NP EN 933-1:2000 [84]. Na Figura 22 apresenta-se a curva granulométrica de cada umas das areias e da mistura efetuada.

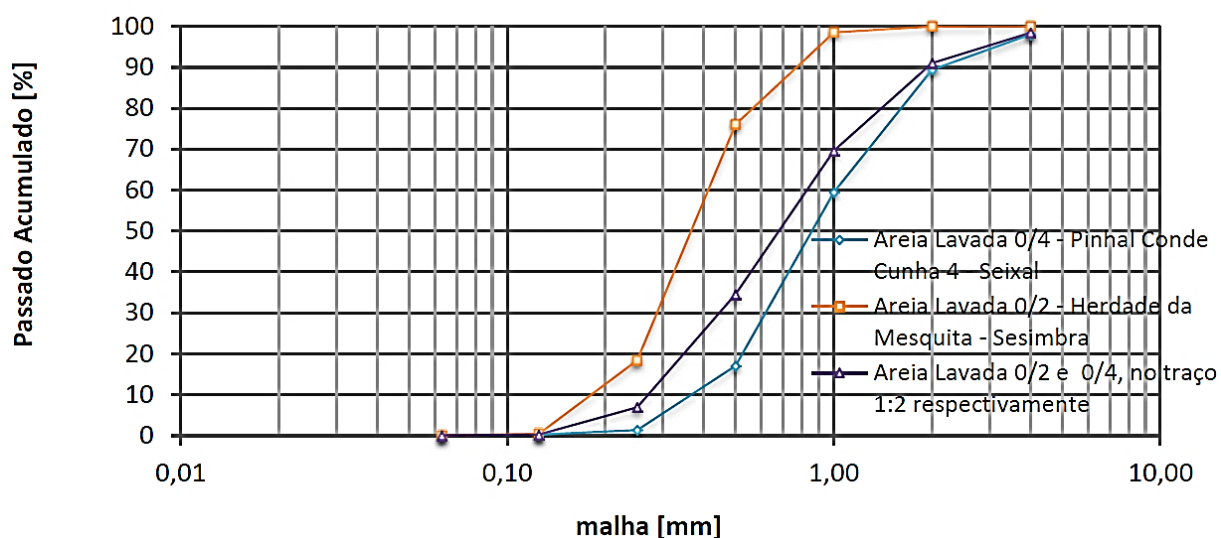


Figura 22 - Curva granulométrica das areias e da mistura de areias [36]

Esta mistura apresenta uma diminuição do volume de vazios, comparativamente ao uso das areias em separado [36]. O traço volumétrico usado permite obter uma areia bem graduada.

Os valores da massa volúmica e baridade de cada uma das areias e da mistura das mesmas, encontram-se na Tabela 14.

Tabela 14 - Massa volúmica e baridade dos agregados utilizados [36]

Agregado	Massa volúmica [kg/m ³]	Baridade [kg/m ³]
Areia 0/2	2570,83	1495,83
Areia 0/4	2464,54	1554,05
Mistura areia 0/2 e areia 0/4	2814,29	1585,97

4.2.3. FÍLER CALCÁRIO

O fíler calcário (Figura 23) usado neste trabalho é proveniente da *Areipor – Areias Portuguesas*.



Figura 23 – Fíler calcário

Na Tabela 15, fornecida pelo fabricante, encontra-se o desempenho declarado.

Tabela 15 - Desempenho declarado do fíler calcário [85]

Características	Desempenho
Descrição petrográfica	Agregados com forma maioritariamente esférica, sub-arredondados e com superfície rugosa, constituídos por quartzo e turmalina
Massa volúmica [kg/m ³]	2590 – 2790
Baridade [kg/m ³]	931
Teor de cloretos [%]	< 0,001
Teor de sulfatos solúveis em ácido	AS _{0,2}
Teor de enxofre total [%]	< 0,04%
Teor de húmus	Mais claro que padrão

4.2.4. CINZA VOLANTE

A cinza volante (Figura 24) utilizada foi cedida pela cimenteira SECIL já há alguns anos; costuma ser incorporada no fabrico de cimentos e betões. Tem aparência de cor cinzenta escura, como um cimento Portland [18].



Figura 24 – Cinza volante

Tabela 16 – Propriedades da cinza volante obtida em laboratório – Adaptado de: [18]

Características	Desempenho
Massa volúmica [kg/m ³]	2330
Superfície específica por difração a laser [m ² /cm ³]	0,692
Baridade [kg/m ³]	940
Minerais mais abundantes [%]	Quartzo = 44 Mulite = 43,3 Ilite = 12,7
Concentração de iões hidroxilos e em óxido de cálcio [mmol/l]	OH ⁻ = 60,6 CaO = 7,0
Resultado do ensaio de pozolanicidade	Positivo a 8 dias

Apresentam-se na Tabela 17 os resultados da análise química à cinza volante, efetuada por [18].

Tabela 17 - Análise química da cinza volante – Adaptado de: [18]

	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	MgO	Cl ⁻	P.F.	R.I.	N.D.
%	80,8	4,07	3,93	3,91	0,70	0,20	Não detetados	6,38	79,23	0,73
P.F. – Perda ao fogo; R.I. – Resíduo insolúvel; N.D. – Não doseado										

4.3. COMPOSIÇÕES ESTUDADAS

As argamassas foram produzidas com uma mistura, devidamente proporcionada pelo método de Feret, de água, cimento CEM I 32,5 N, areia fina 0/2 e areia grossa 0/4, estas últimas na proporção volumétrica 1:2.

As composições em estudo foram avaliadas, inicialmente, recorrendo à execução de uma mistura teste para confirmar a dosagem dos diferentes componentes.

Assim, obteve-se uma dosagem total de todos os componentes para cada tipo de argamassa produzida, bem como respetivos traços em massa e volume, conforme Tabela 18 e Tabela 19 respetivamente.

Tabela 18 - Dosagem total dos componentes para cada argamassa produzida

Argamassa	Ligante (L)		Areia 0/2 [kg]	Areia 0/4 [kg]	Água [L]	A/L
	Cimento [kg]	Substituição [kg]				
De referência	3,79	-				0,65
Com substituição de 15% de cimento por fíler calcário	3,23	0,45				0,67
Com substituição de 30% de cimento por fíler calcário	2,66	0,89	4,78	9,93	2,47	0,70
Com substituição de 15% de cimento por cinza volante	3,23	0,45				0,67
Com substituição de 30% de cimento por cinza volante	2,66	0,89				0,70

Tabela 19 - Traços em massa e em volume para cada uma das argamassas produzidas

Argamassa	Traço	
	Massa	Volume
De referência	1:3,88	1:3
Com substituição de 15% de cimento por fíler calcário	1:0,14:4,56	1:0,18:3,53
Com substituição de 30% de cimento por fíler calcário	1:0,34:5,54	1:0,43:4,29
Com substituição de 15% de cimento por cinza volante	1:0,14:4,56	1:0,18:3,53
Com substituição de 30% de cimento por cinza volante	1:0,34:5,55	1:0,43:4,29

Considerando o ligante das argamassas como sendo o conjunto de cimento e do material que o substituiu, os traços, em massa e em volume aparente, das argamassas são os que se apresentam na Tabela 20.

Tabela 20 - Traços em massa e em volume para cada uma das argamassas produzidas, considerando como ligante o conjunto cimento e material substituinte

Argamassa	Traço	
	Massa	Volume
De referência	1:3,88 \approx 1:4	1:3
Com substituição de 15% de cimento por fíler calcário	1:4,01 \approx 1:4	1:3
Com substituição de 30% de cimento por fíler calcário	1:4,15 \approx 1:4	1:3
Com substituição de 15% de cimento por cinza volante	1:4,01 \approx 1:4	1:3
Com substituição de 30% de cimento por cinza volante	1:4,15 \approx 1:4	1:3

4.4. PRODUÇÃO DAS ARGAMASSAS

Na preparação das argamassas seguiu-se, sempre que possível, as normas aplicáveis NP EN 196-1:2005 [81] e EN 1015-2/A1:1998/2006 [80] uma vez que estão indicadas para a produção de argamassas de cimento.

Iniciou-se o processo com a prévia pesagem dos diversos constituintes (Figura 25a), recorrendo a uma balança de precisão 0,1 g. Após pesados todos os constituintes a usar na mistura, procedeu-se à mistura dos componentes secos (ligante, areias e o material a usar na substituição do ligante, sempre que aplicável), num tabuleiro, com auxílio de uma colher, e procedeu-se à homogeneização (Figura 25b) da matéria-prima a seco, manualmente. De seguida colocou-se a mistura homogeneizada na cuba da misturadora e ligou-se esta, na velocidade mais baixa, enquanto se foi deitando a água em fio através do funil (Figura 25c). Passados 3 minutos de amassadura, a misturadora foi desligada de modo a possibilitar a raspagem do material acumulado na parte inferior da cuba e da pá (Figura 25d). Por fim, voltou-se a ligar a misturadora, na velocidade mais baixa, por mais 2 minutos totalizando uma amassadura de 5 minutos, que pareceu o suficiente, tendo em conta que não se usou a capacidade máxima da misturadora.

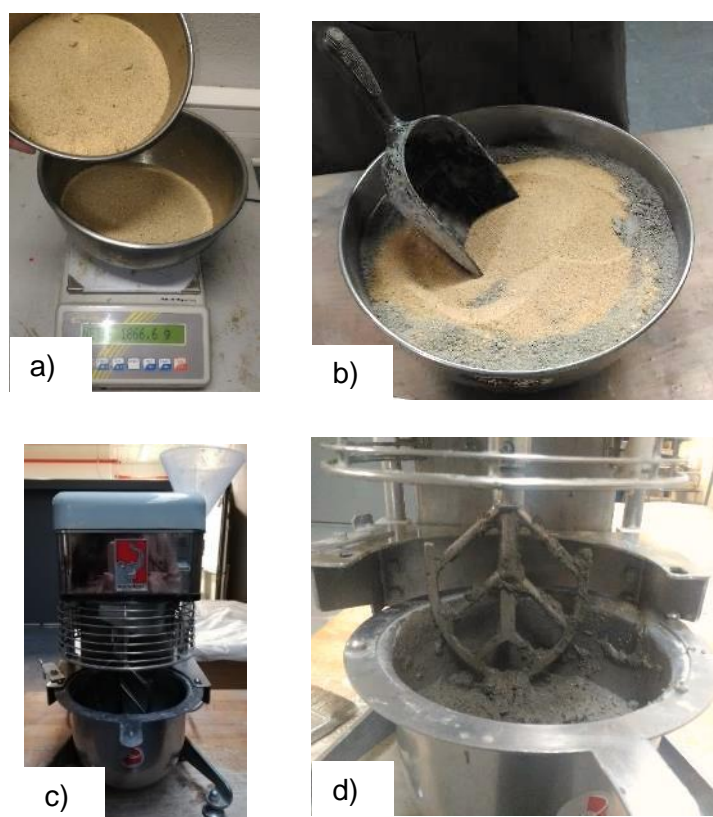


Figura 25 - Produção da argamassa: a) pesagem da matéria-prima; b) homogeneização da matéria-prima a seco e manualmente; c) misturadora mecânica utilizada no procedimento; d) raspagem do material acumulado no fundo da cuba.

4.5. PLANO DE ENSAIOS

De forma a avaliar as propriedades de cada argamassa, foi elaborado um plano de ensaios no estado fresco e endurecido, aos 28 e aos 120 dias. Na Tabela 21, encontram-se sintetizados os ensaios efetuados, a idade em que foram realizados e a norma aplicável a cada um.

Tabela 21 - Síntese dos ensaios realizados e respetivas normas

	Ensaio	Idade do ensaio	Documento bibliográfico
Estado fresco	Consistência por espalhamento	0 dias	EN 1015-3:1999 [86]
	Massa volúmica aparente	0 dias	EN 1015-6:1998 [87]
	Teor de ar	0 dias	EN 1015-7:1998 [88]
	Acabamento	0 dias	Não aplicável
Estado endurecido	Resistência à tração por flexão	28 dias	EN 1015-11:1999 [89]
	Resistência à compressão	28 dias	
	Velocidade de propagação de ultrassons (método direto)	28 dias	EN 12504-4:1998 [90]
	Aderência por arrancamento	28 dias	Adaptado de EN 1015-12:2000 [91]
	Porosidade aberta	28 dias	NP EN 1936:2008 [92] e LNEC E 394:1993 [93]
	Absorção de água por capilaridade	28 dias	EN 1015-18:2002 [94]

No total, foram produzidos cinco tipos de argamassa e, para cada tipo de argamassa, ensaiaram-se cinco provetes prismáticos (40x40x160 milímetros) em diferentes condições, quanto ao teor de humidade (húmidos e secos) e quanto ao estado (danificado e não danificado). Isto perfaz um total de vinte provetes, para cada um dos cinco tipos de argamassa, ensaiados aos 28 e aos 120 dias, conforme esquema da Figura 26.

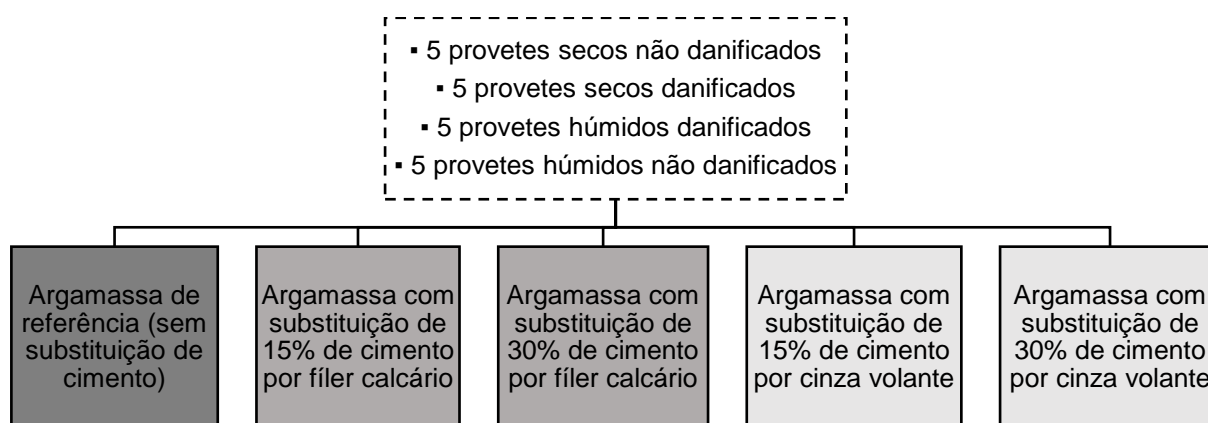


Figura 26 – Esquematização dos provetes elaborados e ensaiados para cada tipo de argamassa

A capacidade de autorregeneração é avaliada por recurso a ensaios que permitem verificar a selagem das fissuras e a recuperação das propriedades mecânicas do espécime. Como tal, procedeu-se a um planeamento dos ensaios de modo a obter os dados necessários, para uma correta avaliação do desenvolvimento e recuperação das propriedades de cada argamassa, ao longo do tempo. A Tabela 22 contempla, de um modo simplificado, uma planificação dos diferentes ensaios efetuados, bem como das monitorizações realizadas.

Tabela 22 - Planificação dos ensaios laboratoriais

28 dias	120 dias
5 provetes secos → Ensaios no estado endurecido	-
5 provetes húmidos → produção do dano → medição de ultrassons → secagem → Ensaios no estado endurecido	-
5 provetes húmidos danificados → medição de ultrassons (medição periódica até aos 120 dias)	Colocação dos provetes na estufa (24h a 60°C) → Ensaios no estado endurecido
5 provetes húmidos não danificados → medição de ultrassons (medição periódica até aos 120 dias)	Colocação dos provetes na estufa (24h a 60°C) → Ensaios no estado endurecido

4.6. CARACTERIZAÇÃO NO ESTADO FRESCO

No estado fresco avaliar-se-á a consistência por espalhamento, massa volúmica aparente, teor de ar e facilidade de aplicação e acabamento através, sempre que existente, da utilização de procedimentos constantes na normalização em vigor. Conforme referido anteriormente, foram elaborados cinco tipos de argamassa com composições diferentes. Concluída a amassadura das diferentes argamassas, realizaram-se os diferentes ensaios no estado fresco.

4.6.1. CONSISTÊNCIA POR ESPALHAMENTO

A consistência por espalhamento da argamassa é determinada tendo por base o disposto na norma EN 1015-3:1999 [86]. Este ensaio avalia a consistência da argamassa, medindo o seu espalhamento quando submetida a determinado número de pancadas, produzidas recorrendo a uma mesa de espalhamento. Deste modo, é avaliada a influência da água e indiretamente a trabalhabilidade de uma argamassa após a sua amassadura.

Inicialmente, procedeu-se ao humedecimento do prato e do molde tronco cónico da mesa de espalhamento (Figura 27a). Seguidamente, e com o tronco cónico devidamente centrado no prato da mesa de espalhamento, colocou-se a argamassa no seu interior em 2 camadas, cada uma compactada recorrendo ao uso de um varão metálico.

O topo do molde foi rasado com o auxílio de uma colher de pedreiro removendo assim o excesso de argamassa e limpou-se, com um pano humedecido, qualquer resíduo de argamassa que tenha caído na superfície da mesa de espalhamento (Figura 27b). De seguida, o molde foi retirado com um movimento ascendente contínuo e a amostra submetida a 15 pancadas verticais provocadas pelo mecanismo que se encontra na base da mesa de espalhamento.

Foram efetuadas quatro medições, com o auxílio de um paquímetro digital, ao diâmetro do espalhamento observado (Figura 27c). Para obter o resultado da consistência por espalhamento, para cada amassadura, foi efetuada uma média do resultado obtido para cada medição, obtendo-se assim, o valor médio do espalhamento expresso em milímetros.



Figura 27 - Ensaio de consistência por espalhamento: a) dispositivo de ensaio; b) preparação do molde; c) medição do espalhamento

4.6.2. MASSA VOLÚMICA APARENTE

A determinação da massa volúmica aparente da argamassa no estado fresco tem por base o disposto na norma EN 1015-6:1998 [87]. Neste procedimento, um recipiente (cujo volume e massa são conhecidos) é preenchido com argamassa até cerca de metade da sua capacidade. Com o auxílio de um varão metálico procede-se à compactação da camada inicial de argamassa com 15 pancadas, uniformemente distribuídas. De seguida, efetua-se o enchimento restante do recipiente, retirando cuidadosamente o excesso de argamassa. De seguida, procede-se à compactação aplicando novamente 15 pancadas uniformemente distribuídas. O recipiente é rasado tendo o cuidado de limpar qualquer argamassa no seu exterior e procede-se à pesagem e registo da sua massa.

A quantificação da massa volúmica aparente no estado fresco [kg/m^3] da argamassa é feita através da seguinte equação (Eq. 5).

$$\rho = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (\text{Eq. 5})$$

em que,

ρ – Massa volúmica aparente da argamassa no estado fresco [kg/m^3];

m_2 – Massa da argamassa e recipiente juntos [kg];

m_1 – Massa do recipiente [kg];

V – Volume do recipiente [m^3].

4.6.3. TEOR DE AR

O teor de ar na argamassa produzida foi determinado pelo método pressiométrico que teve por base a EN 1015-7:1998 [88] recorrendo ao medidor de ar para argamassas *CE055* da *IMPACT* (Figura 28a).

O procedimento iniciou-se com o enchimento do recipiente em três camadas, sendo cada uma devidamente compactada com o auxílio de um varão metálico. Retirou-se qualquer excesso de argamassa existente no rebordo do recipiente e, de seguida, o mesmo é acoplado ao aparelho através das pinças existentes. O sistema de válvulas cria pressão (Figura 28b) para que a água seja forçada a preencher os vazios da mistura e, desta forma, é feita a leitura do teor de ar contido na argamassa através do manómetro (Figura 28c).

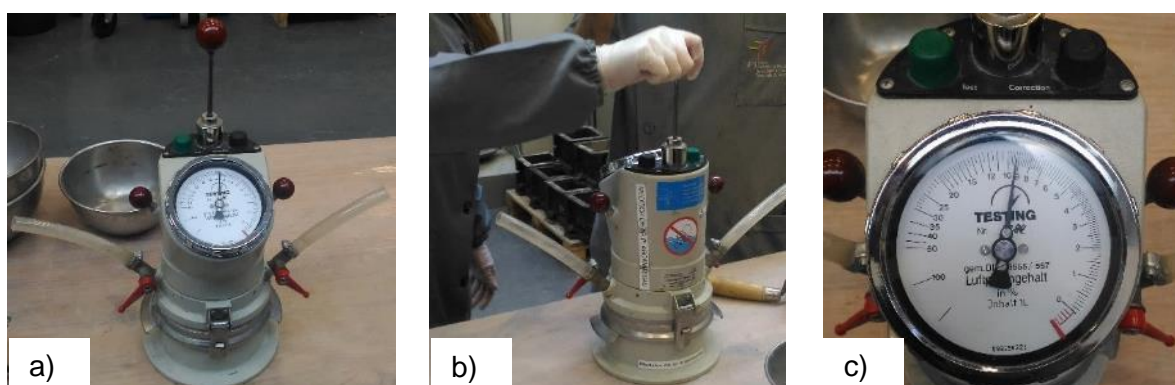


Figura 28 - Ensaio do teor de ar na argamassa no estado fresco: a) aparelho medidor de ar; b) criação de pressão no recipiente; c) leitura do teor de ar na argamassa

4.7. PREPARAÇÃO DE PROVETES DE ARGAMASSA NO REVESTIMENTO DE TIJOLO

Este ensaio teve como objetivo simular a aplicação da argamassa como reboco e foi baseado nos procedimentos efetuados por Martins A. [36]. Assim, procedeu-se à aplicação de uma camada de argamassa numa das faces de um tijolo cerâmico, com o auxílio de uma cofragem de madeira a envolver o tijolo e uma colher de pedreiro. A argamassa é deixada cair sobre a face do tijolo a uma altura de cerca de 75 centímetros, medida através de fita métrica (Figura 29a), por forma a simular a energia de aplicação em obra. O acabamento foi efetuado recorrendo a uma talocha, com o objetivo de remover o excesso de argamassa (Figura 29b) e obter uma superfície homogénea (Figura 29c).

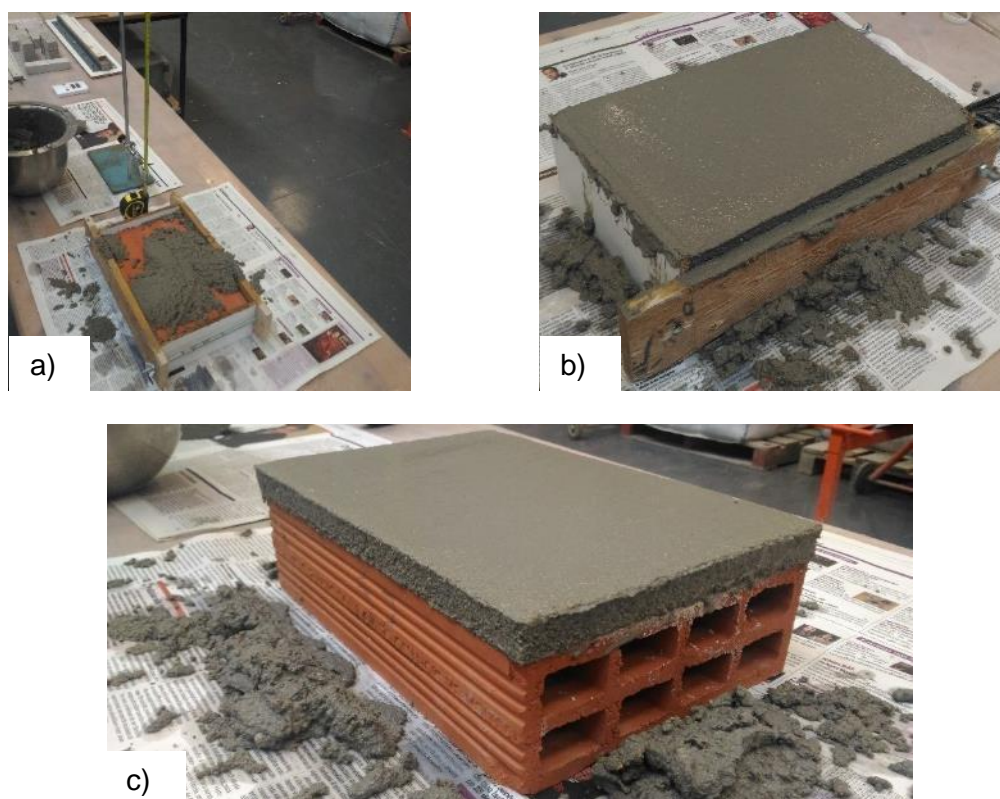


Figura 29 - Aplicação do revestimento: a) simulação de aplicação em obra; b) remoção do excesso de argamassa; c) remoção da cofragem

Antes de proceder à aplicação da argamassa na superfície do tijolo, este foi humedecido de forma a evitar a absorção da água da amassadura, visto o material cerâmico ter grande capacidade de absorção. Todavia, foi tido o cuidado de não saturar a superfície com água, de modo a não prejudicar a aderência entre o tijolo e a argamassa.

A cura destes provetes foi feita em ambiente de laboratório, protegido a temperatura de $\pm 20^{\circ}\text{C}$ e humidade relativa do ar de $\pm 50\%$.

Este ensaio permitiu fazer uma análise visual da superfície obtida e possível fissuração aquando da aplicação da argamassa no suporte ao longo do tempo.

4.8. MOLDAGEM, DESMOLDAGEM E CURA DOS PROVETES PRISMÁTICOS

Foram produzidos os provetes prismáticos em moldes metálicos. Cada molde metálico possui um volume de 256 cm^3 e permite que se prepare, em simultâneo, três provetes prismáticos com $40 \times 40 \times 160\text{ mm}^3$ cada um.

No processo de moldagem dos provetes, o primeiro passo consistiu na limpeza dos moldes, seguido da aplicação de óleo descofrante, com o auxílio de um pincel, em toda a superfície

de contacto com a argamassa. Posteriormente, e conforme se observa na Figura 30a, o molde é acoplado com uma alonga sobre a mesa do compactador e de seguida, o conjunto é fixado à referida mesa. Procedeu-se depois, ao enchimento do molde, com recurso a uma colher de pedreiro, até metade da sua capacidade e, com o auxílio de uma espátula adequada, regularizou-se a argamassa no molde. De seguida, acionou-se o compactador, o qual, automaticamente, executa 60 pancadas, compactando a argamassa. Conforme se observa na Figura 30b, concluiu-se o enchimento do molde, tendo o cuidado de colocar um pouco de argamassa em excesso e repetiu-se o passo anterior, descrito para a primeira camada. Por último, o molde foi retirado da mesa de compactação, a alonga removida e, através de uma colher de pedreiro, regularizou-se a face de enchimento dos provetes, através de movimentos de “serra”, retirando o excesso de argamassa (Figura 30c).

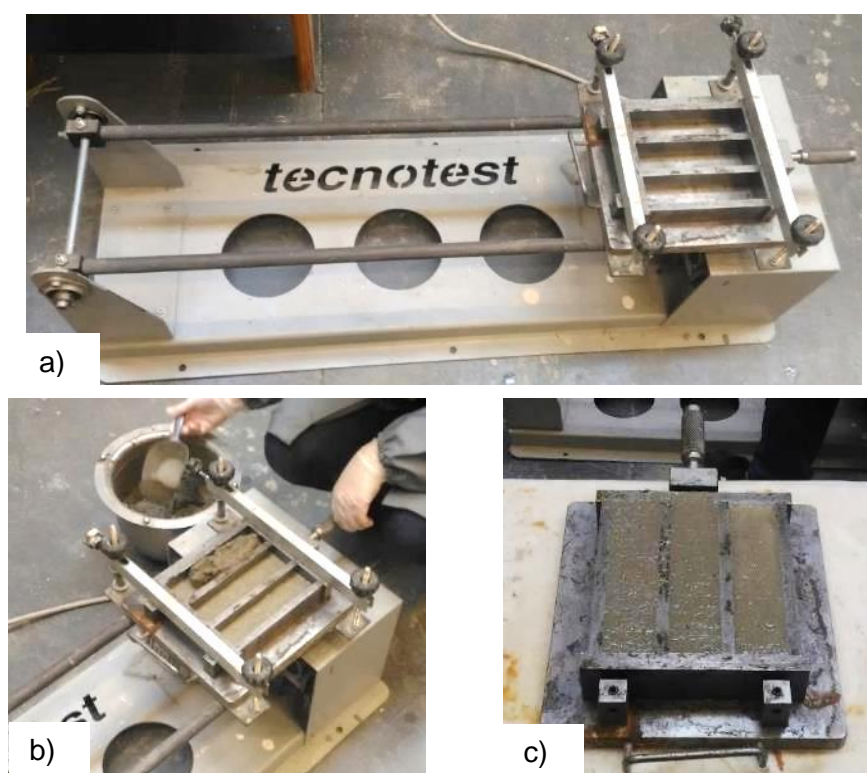


Figura 30 – Moldagem dos provetes: a) fixação do molde à mesa de compactação b) enchimento do molde; c) molde com o excesso de argamassa rasado após compactação

A desmoldagem dos provetes foi efetuada 3 dias após a data de produção. Aquando deste processo, foi feita uma verificação da retração longitudinal dos provetes da argamassa ainda no molde, conforme consta em 4.10.1.

Relativamente às condições de cura, os provetes foram conservados numa caixa estanque, com uma humidade relativa próxima dos 100%.

Estas condições foram obtidas pela existência de uma altura de água no interior da caixa sem, no entanto, contactar diretamente com os provetes (Figura 31a). Os provetes foram conservados em caixas individuais, conforme o tipo de argamassa (Figura 31b) até ao momento de ensaio.

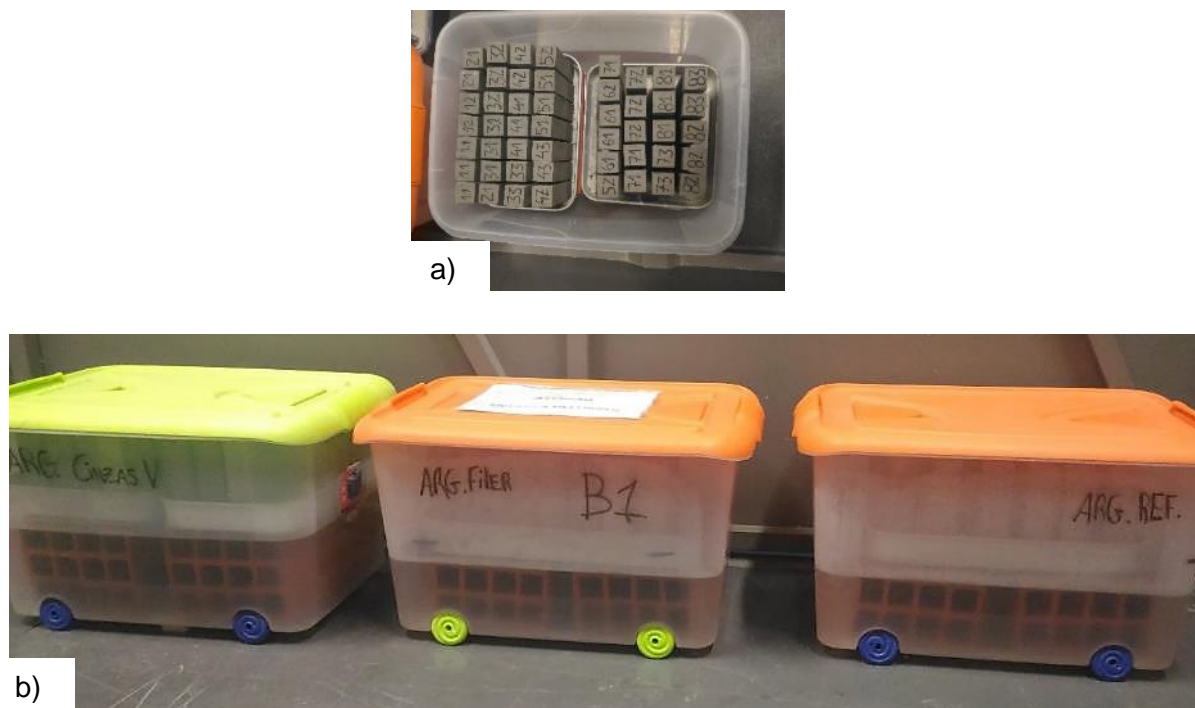


Figura 31 - Cura dos provetes: a) provetes após desmoldagem e devidamente identificados; b) condições de cura dos provetes

4.9. DANIFICAÇÃO DOS PROVETES

De modo a possibilitar a avaliação da eficiência do processo de autorregeneração, torna-se necessário induzir a microfissuração nos provetes.

De acordo com Liberato F., Van Mullem T. *et al.* [1], os ensaios à compressão, apesar de serem bastante usados para determinar a resistência de um material compósito como uma argamassa, podem ser utilizados para induzir nos provetes um dano difuso em vez de uma única fissura de largura controlada.

Esta metodologia foi usada por [70] que aplicou uma força à compressão, de 50% da carga de rotura, aos 28 dias, de modo a provocar dano nos provetes.

Na presente dissertação, a fissuração foi obtida de um modo controlado aos 28 dias, aplicando 60% da carga de rotura à compressão previamente determinada. No entanto, em laboratório constatou-se que seria possível atingir o valor de 60% sem causar a deterioração completa do provete. O facto de Mukherjee S., Mandal S. *et al.* [70] terem usado no seu ensaio provetes cúbicos e não prismáticos (Figura 32) pode ter afetado a carga à compressão a aplicar.



Figura 32 - Danificação dos provetes - Método de aplicação de carga

Ainda assim, após aplicação de 60% da carga de rotura não se observaram fissuras a olho nu, conforme se pode constatar pela Figura 33.



Figura 33 - Provete após aplicação de carga de 60% do valor à rotura

Tentou-se aplicar mais carga de modo a ser possível visualizar algumas fissuras, mas o provete acabava por se deteriorar por completo (Figura 34), impedindo assim a realização dos ensaios para a avaliação das suas propriedades.



Figura 34 - Provete após aplicação de carga superior a 60% do valor à rotura

4.10. CARACTERIZAÇÃO NO ESTADO ENDURECIDO

Antes de dar início aos ensaios no estado endurecido, definiu-se qual o destino de cada um dos provetes. Para cada provete ensaiado, foi adotada a metodologia conforme se observa no esquema da Figura 35.

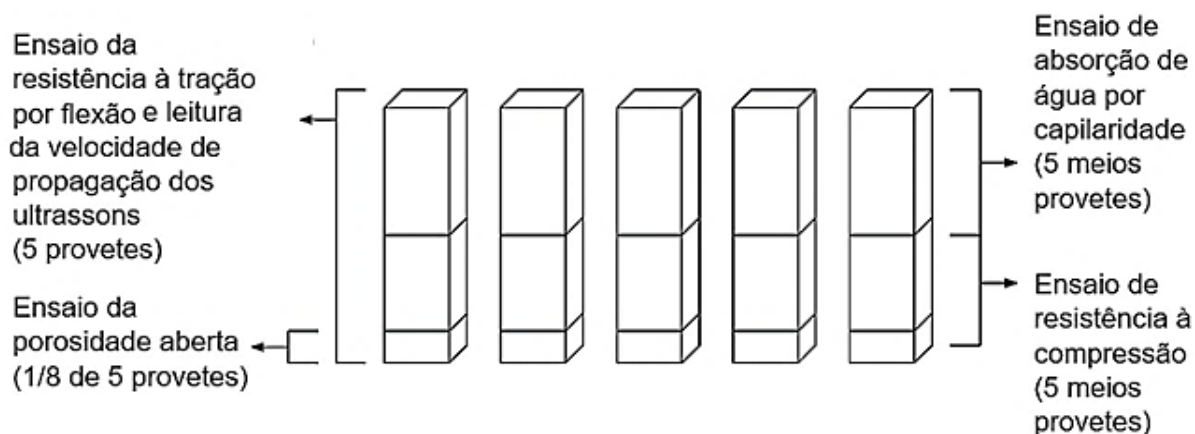


Figura 35 - Esquema de utilização dos provetes

No estado endurecido avaliou-se o desempenho mecânico (resistência à tração por flexão e resistência à compressão; módulo de elasticidade dinâmico, calculado a partir da massa volúmica aparente e da velocidade de propagação dos ultrassons; aderência por arrancamento; retração) e o desempenho físico (massa volúmica aparente; porosidade aberta e massa volúmica específica; permeabilidade ao vapor de água; absorção de água por capilaridade) da argamassa elaborada, através, sempre que existente, de procedimentos constantes na normalização em vigor.

Também antes dos ensaios no estado endurecido, os provetes são colocados em estufa a 60 ± 5 °C, por um período de 48 horas. Deste modo é eliminada humidade, sem que ocorra degradação dos provetes.

4.10.1. OBSERVAÇÃO DA RETRAÇÃO NO MOLDE

Antes de efetuar a desmoldagem dos provetes, foram procurados indícios de ocorrência de retração longitudinal nos provetes, recorrendo à inspeção visual dos mesmos, ainda no interior do molde. Durante esta observação analisou-se cuidadosamente todas as faces do provete em contacto com o molde, onde se observaria a retração (Figura 36).



Figura 36 - Inspeção visual de retração longitudinal de um dos provetes no respetivo molde

4.10.2. VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ULTRASSONS E MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO

A velocidade de propagação de ultrassons é avaliada às idades tidas como referência, tanto em provetes prismáticos, como em argamassas aplicadas como revestimento de tijolos, permitindo, assim, confirmar se ocorre um aumento gradual da resistência mecânica com o tempo. É ainda possível analisar uma correlação entre os valores das tensões de rotura à compressão e flexão e a velocidade de propagação de ultrassons das argamassas.

A determinação da velocidade de propagação de ultrassons é efetuada recorrendo a um equipamento de medição de ultrassons, o qual, através de dois transdutores, um emissor e um recetor, emite uma onda ultrassónica que percorre a argamassa, registando o tempo de percurso. Segundo a EN 1254-4:1998 [95] existem três métodos distintos de determinação da velocidade dos ultrassons: direto (Figura 37a), semidirecto (Figura 37b) e indireto (Figura 37c).

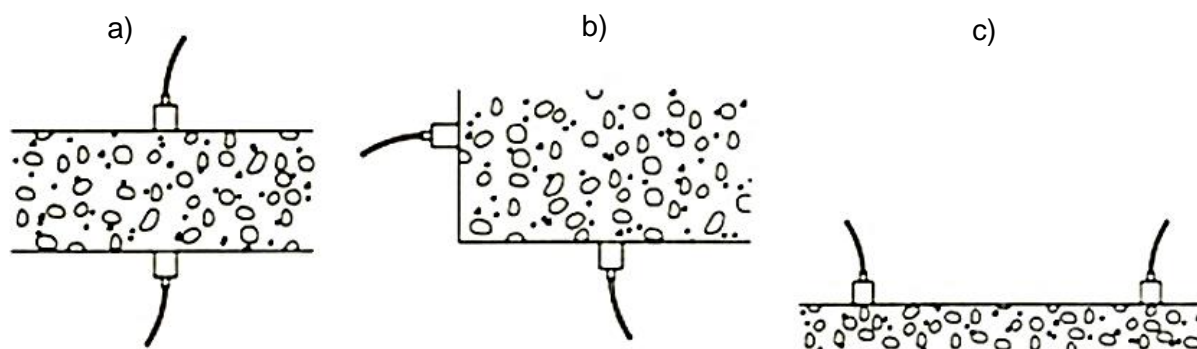


Figura 37 - Ensaio de medição da velocidade de ultrassons através do método: a) direto; b) semidirecto; c) indireto – Adaptado de: [96]

Na presente dissertação, optou-se por usar o método de ensaio direto, pelo facto de permitir obter uma medição mais precisa, uma vez que a energia de impulso é transmitida segundo a direção normal ao emissor [96] e ao mesmo tempo, ser um ensaio não destrutivo. Foi tido o

cuidado de melhorar o contacto entre os transdutores e a argamassa, alisando a argamassa e recorrendo a uma massa de contacto.

O ensaio inicia-se com a calibração do equipamento e a introdução do método a utilizar e da dimensão do provete (Figura 38a). Uma vez calibrado, procede-se à marcação dos pontos a realizar as medições. De modo a obter resultados fiáveis optou-se por criar um molde para a marcação dos pontos e garantir, assim, que estes têm a mesma localização e distância entre eles independentemente do provete em que são marcados. Após a marcação dos pontos (Figura 38b) procedeu-se ao posicionamento dos transdutores nos topos dos provetes e à realização de nove medições do tempo que a onda demora a percorrer o prisma (16 cm) (Figura 38c).

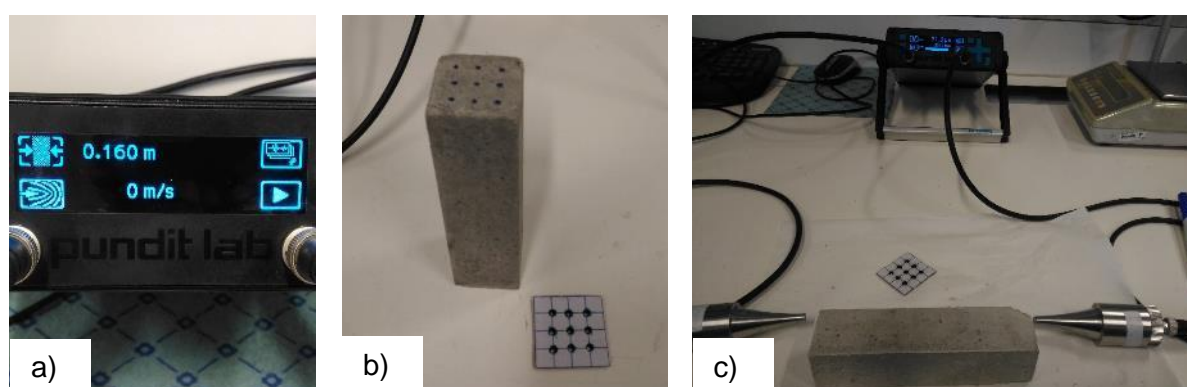


Figura 38 – Leitura da velocidade de ultrassons: a) introdução da dimensão do provete no equipamento; b) marcação dos pontos de leitura no provete; c) posicionamento dos transdutores e leitura

A análise dos ultrassons em 9 pontos distintos do provete foi feita com o intuito de identificar quaisquer variações a este valor nas diferentes faces do provete e no centro. No entanto, após uma análise dos valores obtidos, não foi possível estabelecer uma correlação entre o local de medição e a velocidade de propagação dos ultrassons, optando-se assim, por recorrer à análise dos valores médios obtidos.

A velocidade percorrida pelos impulsos ultrassónicos, em m/s, é indicada no equipamento de medição. Com base neste valor, é possível determinar o módulo de elasticidade. Este parâmetro está relacionado com a deformabilidade sendo que quanto maior for o referido módulo, menos deformável será a argamassa [36].

A determinação da velocidade de propagação dos ultrassons e do módulo de elasticidade, foi efetuada aos 28 dias e aos 120 dias. Sendo que a velocidade de propagação dos ultrassons foi ainda monitorizada de 15 em 15 dias até atingir os 120 dias de idade. Pretendeu-se deste modo avaliar a eventual autorregeneração do provete.

4.10.3. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR FLEXÃO

A determinação da tensão de rotura à flexão foi feita com recurso a uma prensa de flexão/compressão e baseou-se no disposto na EN 1015–11:1999 [89].

Inicialmente, procedeu-se à introdução de alguns dados no software equipamento de ensaio, como a dimensão do provete, a distância entre eixos, entre outras, conforme se observa na Figura 39. De seguida, procede-se ao posicionamento do provete prismático, segundo o seu eixo longitudinal, sobre dois apoios cilíndricos equidistantes do centro (Figura 39b). Posteriormente, a força é aplicada a meio do provete, lentamente e gradualmente até ocorrência de rotura (Figura 39c).

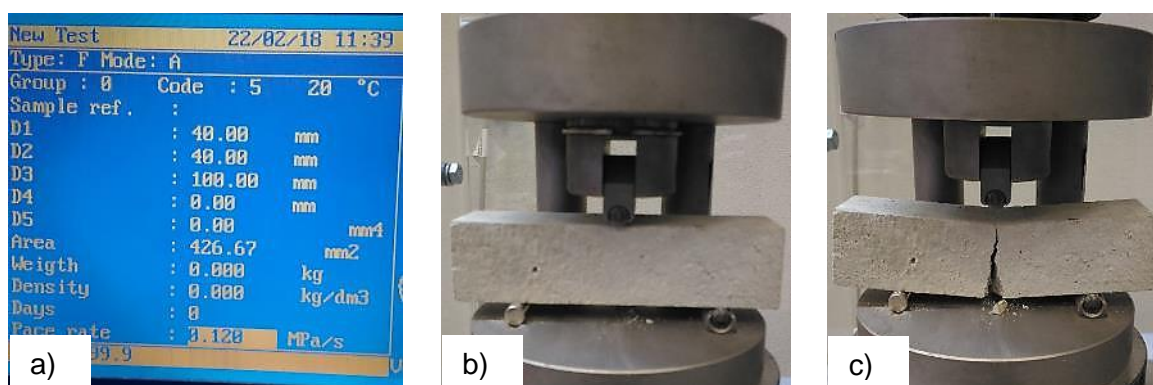


Figura 39 - Procedimento do ensaio da resistência à tração por flexão: a) introdução dos dados no equipamento; b) posicionamento do provete; c) rotura do provete

A tensão de rotura à flexão é calculada automaticamente pelo software do equipamento e expressa em MPa.

4.10.4. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

A determinação da tensão de rotura à compressão foi feita com recurso a uma prensa de flexão/compressão e baseou-se no disposto na EN 1015–11:1999 [89].

Do ensaio de flexão resultam dois meios provetes, um dos quais é posteriormente utilizado na determinação da tensão de rotura à compressão. Tal como no ensaio da tensão de rotura à flexão, inicialmente introduzem-se alguns dados no software do equipamento (Figura 40a). De seguida, as metades dos provetes são colocadas entre os dois pratos da prensa (Figura 40b) e submetidas à aplicação gradual de força, até à rotura (Figura 40c).

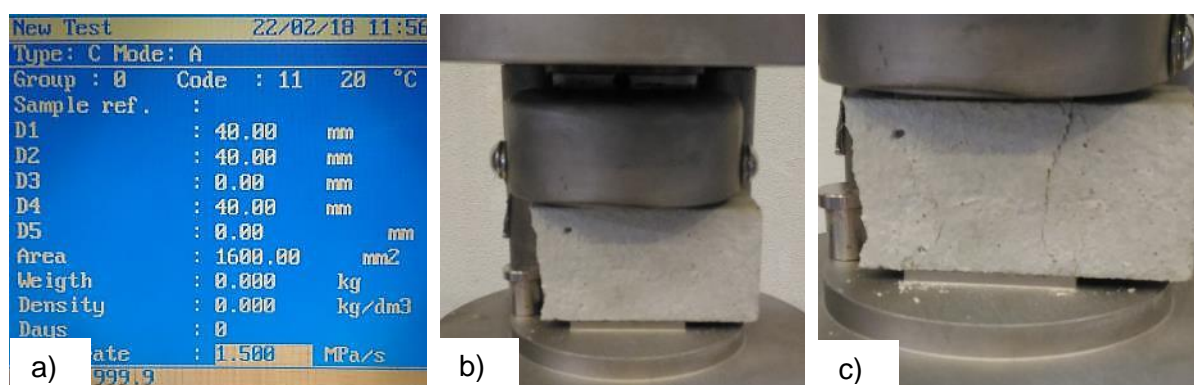


Figura 40 - Procedimento do ensaio da resistência à compressão: a) introdução dos dados no equipamento; b) posicionamento do provete; c) rotura do provete

A tensão de rotura à compressão é calculada automaticamente pelo software do equipamento e expressa em MPa.

4.10.5. POROSIDADE ABERTA E MASSAS VOLÚMICAS

O ensaio para a avaliação da porosidade aberta foi realizado de acordo com o disposto na NP EN 1936:2008 [92] e na especificação do LNEC E 394:1993 [93]. Os provetes ensaiados corresponderam aos topos sobranceiros dos provetes utilizados na avaliação da resistência à compressão das argamassas. Como o ensaio foi realizado imediatamente a seguir ao ensaio de resistência à compressão, os provetes estavam secos prosseguindo-se diretamente para a determinação da massa seca (m_1).

Para começar o ensaio, os provetes foram introduzidos num exsiccador (Figura 41a) ligado a uma bomba de vácuo onde se manteve uma pressão de vácuo constante, durante 24 horas, com o objetivo de retirar o ar contido nos poros dos provetes. Terminado este período de 24 horas e, mantendo a pressão, introduziu-se água no exsiccador até à total imersão dos provetes (Figura 41b). Os provetes permaneceram imersos durante 24 horas à pressão referida e, terminado este tempo, os provetes foram mantidos imersos à pressão atmosférica até à avaliação da sua massa saturada com a superfície seca (m_3) e após pesagem hidrostática (m_2) (Figura 41c). Ao restabelecer a pressão atmosférica, a água é forçada a penetrar e preencher os vazios do provete.

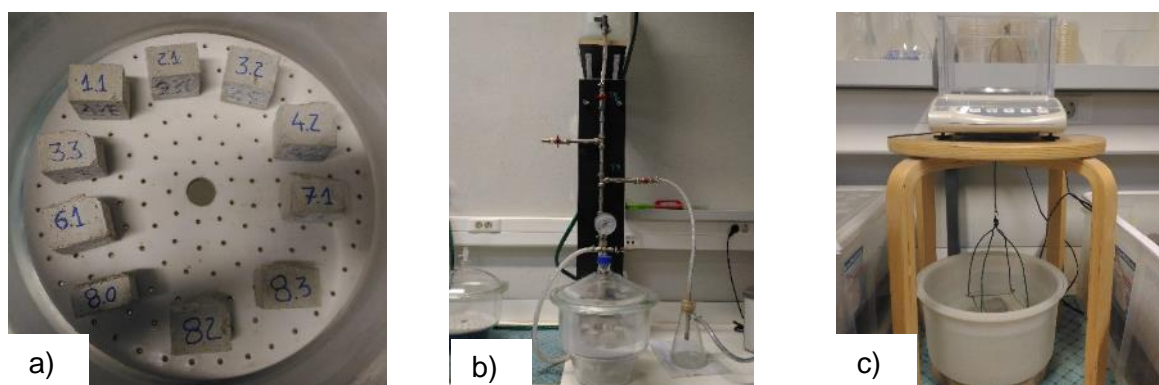


Figura 41 - Ensaio de avaliação da porosidade: a) colocação dos topos dos provetes no exsiccador; b) introdução de água no exsiccador; c) pesagem hidrostática

Deste modo, é obtida a relação entre o volume de vazios, sejam estes poros, capilares ou fraturas, acessíveis à água e o volume aparente da amostra – ou seja, a porosidade aberta ($P_{Ab.}$) do material, que se obtém através da equação (Eq. 6).

$$P_{Ab.} = \frac{m_3 - m_1}{m_3 - m_2} \times 100 \quad [\%] \quad (\text{Eq. 6})$$

São ainda calculadas a massa volúmica aparente ($MV_{Ap.}$) e a massa volúmica específica ($MV_{Esp.}$) do material, conforme as equações (Eq. 7) e (Eq. 8) respetivamente.

$$MV_{Ap.} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \times \rho_{rh} \quad [\text{kg/m}^3] \quad (\text{Eq. 7})$$

$$MV_{Esp.} = \frac{m_1}{m_1 - m_3} \times \rho_{rh} \quad [\text{kg/m}^3] \quad (\text{Eq. 8})$$

Em que ρ_{rh} corresponde à massa volúmica da água a 20°C e tem o valor de 998 kg/m³.

Foi efetuada uma média dos valores obtidos, da porosidade aberta, massa volúmica aparente e massa volúmica específica para cada tipo de argamassa.

4.10.6. ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

A determinação da absorção de água por capilaridade teve por base o disposto na EN 1015-18:2002 [94]. Este ensaio permite avaliar a capacidade que a argamassa tem de absorver água, estando em contacto direto com esta ou estando presente no ar (humidade).

Neste ensaio os provetes devem estar secos e com massa constante, o que se verificou após colocá-los em estufa, à temperatura de 60 ± 5 °C, por um período de 48 horas. Após este

período, e arrefecimento dos provetes, procede-se à sua pesagem de modo a avaliar a sua massa seca (m_1).

De forma a simular um ambiente saturado utilizou-se o sistema descrito por Leal M. [35] que incide nos seguintes passos:

- Colocaram-se dois tijolos no fundo de uma caixa plástica preenchida com água até metade da altura da sua altura;
- Vedou-se a tampa da caixa, mantendo a mesma fechada e registando uma humidade relativa (HR) perto dos $95 \pm 5\%$;
- Colocou-se um tabuleiro sobre os tijolos e uma manta geotêxtil, por cima do tabuleiro, funcionando como uma película absorvente;
- Sobre a forra geotêxtil, colocaram-se cantoneiras de plástico;
- Preencheu-se o fundo do tabuleiro com água até uma altura de 5 milímetros acima das cantoneiras de plástico, sendo essa a medida a que os provetes se mantiveram submersos (aproximadamente 5 milímetros).

Uma vez preparada a montagem do sistema de ensaio (Figura 42a), procede-se à avaliação da massa dos provetes ao longo do tempo. Estas medições foram efetuadas aos 5 min, 10 min, 15 min, 30 min, 1h, 3h, 24 h, 48 h, 72 h e por aí em diante, até atingir o valor assintótico. O valor assintótico é atingido a partir do momento em que a absorção de água, por parte do provete, é inferior a 1% da sua massa total ao fim de 24 h.

Em cada medição, foi tido o cuidado de retirar o excesso de água nas faces dos provetes com um pano húmido, antes da sua pesagem. De seguida, o provete foi colocado novamente no tabuleiro e, sempre que necessário, adicionou-se água, lentamente de modo a repor a quantidade que foi sendo absorvida pelos provetes (Figura 42b).

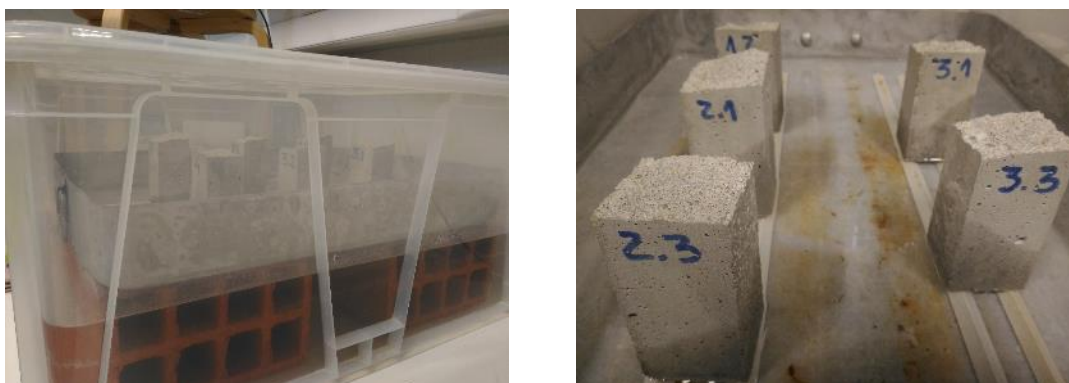


Figura 42 - Ensaio de absorção de água por capilaridade: a) sistema usado para simular um ambiente saturado; b) absorção de água pelos provetes

A massa de água absorvida por unidade de superfície do provete em contacto com a água ao fim do tempo t_i ($\Delta M_i/S$) é calculada pela equação (Eq. 9):

$$\Delta M_i/S = \frac{m_i - m_1}{A} \quad [\text{kg/m}^2] \quad (\text{Eq. 9})$$

Em que,

m_i – Massa do provete ao fim do tempo t_i [kg];

m_1 – Massa do provete seco [kg];

A – Área da face do provete em contacto com a água [$A = 0,0016 \text{ m}^2$].

Com base nos valores obtidos, foi traçada a curva de absorção de água por capilaridade, para cada tipo de provete e argamassa, com base na média da massa de água absorvida ao longo do tempo. Este gráfico representa a quantidade de água absorvida, por unidade de área da secção quadrada do provete, em função da raiz quadrada do tempo i , expresso em minutos.

Através deste ensaio, é possível ainda determinar o coeficiente de capilaridade (C.C.) de cada provetes de argamassa, através do declive do troço inicial das curvas, e o valor assintótico médio (V.A.), que corresponde ao valor de absorção de água por capilaridade obtido no troço horizontal do gráfico (patamar de saturação) conforme também referencia [97].

4.10.7. ADERÊNCIA POR ARRANCAMENTO – ENSAIO DE ARRANCAMENTO POR TRAÇÃO “PULL-OFF” E OBSERVAÇÃO DE FISSURAÇÃO NOS TIJOLOS

Antes de iniciar o ensaio de aderência por arrancamento foi feita uma inspeção visual, de qualquer fissuração existente nos tijolos. O ensaio da aderência por arrancamento teve por base a EN 1015-12:2000 [91] e permite determinar a força de aderência da argamassa, recorrendo à aplicação de uma tensão máxima, por tração direta, perpendicular à superfície onde esta é aplicada. A aplicação desta tensão é efetuada por meios mecânicos, recorrendo ao equipamento *dyna* da *Proceq Z16* (Figura 43).



Figura 43 – Equipamento usado no ensaio de aderência por arrancamento

O equipamento em questão está calibrado para ser usado com pastilhas circulares, no entanto, optou-se por usar pastilhas quadradas recorrendo à realização de entalhes com recurso a uma rebarbadora de disco fino que, de acordo com [36], degrada menos o provete comparativamente a uma caroteadora.

As pastilhas foram coladas, com o recurso a cola epoxídica, de modo a assegurar uma correta aderência. Deixou-se secar a cola durante um mínimo de 48 horas, assegurando a sua secagem total, e de seguida efetuou-se o ensaio, para cada tipo de argamassa, aos 28 e aos 120 dias. Cada tijolo cerâmico tinha uma argamassa diferente aplicada e, deste modo, efetuou-se o ensaio em 5 tijolos cerâmicos diferentes e em cada um foram aplicadas 6 pastilhas quadradas, conforme se pode observar pela Figura 44.

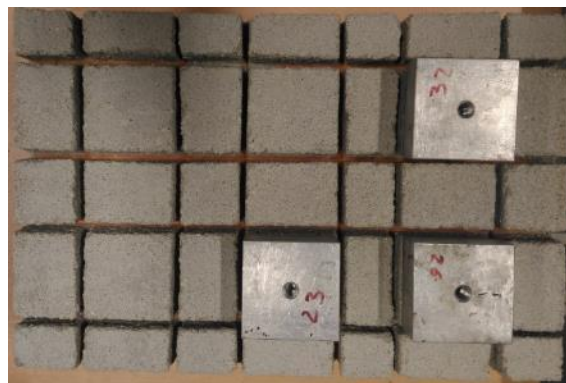


Figura 44 – Pastilhas utilizadas no ensaio de aderência por arrancamento

Iniciando o ensaio, começou-se por colocar o parafuso na pastilha, ligando-o ao equipamento. Foi usado um nível por forma a assegurar a correta posição do equipamento face à superfície de ensaio (Figura 45) e de seguida, procedeu-se ao ensaio e respetiva análise da rotura ocorrida.



Figura 45 – Posicionamento do equipamento do ensaio de aderência por arrancamento

Podem ocorrer diversos tipos de rotura; no entanto, a leitura não é considerada válida se ocorrer na interface da argamassa e da cola usada. Através da equação (Eq. 10) obtém-se a tensão de aderência circular, $\sigma_{\text{circ.}}$ [MPa].

$$\sigma_{\text{circ.}} = \frac{F_{\text{ader.}}}{A_{\text{circ.}}} \quad (\text{Eq. 10})$$

Em que:

$F_{\text{ader.}}$ – Força de rotura lida no aparelho [N];

$A_{\text{circ.}}$ – Área da pastilha circular [mm²] ($A_{\text{circ.}} = 1963,50 \text{ mm}^2$).

Conforme referido anteriormente, uma vez que o equipamento está calibrado para o uso de pastilhas circulares é necessário converter o seu valor. A equação (Eq. 11) permite converter a tensão obtida pelo equipamento, obtendo assim, a tensão de aderência, $\sigma_{\text{ader.}}$ [MPa].

$$\sigma_{\text{ader.}} = \sigma_{\text{circ.}} \times \frac{A_{\text{circ.}}}{A_{\text{quad.}}} \quad (\text{Eq. 11})$$

Em que:

$\sigma_{\text{circ.}}$ – Tensão de aderência circular [MPa];

$A_{\text{circ.}}$ – Área da pastilha circular [mm²] ($A_{\text{circ.}} = 1963,50 \text{ mm}^2$);

$A_{\text{quad.}}$ – Área da pastilha quadrada [mm²] ($A_{\text{quad.}} = 2500,00 \text{ mm}^2$).

5. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

5.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo apresentam-se os resultados da campanha experimental realizada e analisam-se os resultados obtidos nos ensaios efetuados no estado fresco e no estado endurecido, descritos no capítulo 4. Os valores apresentados referem-se à média dos resultados obtidos para cada um dos 5 provetes ensaiados.

Por forma a efetuar o tratamento dos dados, recorreu-se a técnicas estatísticas. Inicialmente foi determinada a média (Eq. 12), que permite obter o valor médio dentro dos valores obtidos:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (\text{Eq. 12})$$

Avaliou-se também o grau de dispersão dos resultados obtidos, através da determinação do desvio padrão (Eq. 13):

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2} \quad (\text{Eq. 13})$$

e do coeficiente de variação (Eq. 14), que, ao relacionar o desvio padrão com a média permite obter uma noção da homogeneidade dos dados obtidos:

$$CV = \frac{S}{\bar{X}} \times 100\% \quad (\text{Eq. 14})$$

Uma vez que os resultados são obtidos em contexto de laboratório, ou seja, com base em procedimentos experimentais e com recurso a equipamentos de laboratório, existe a possibilidade de ocorrência de erros. Estes podem estar associados a erros de leitura e/ou medição, ou seja, erros de procedimento e dar origem a resultados ditos anormais ou, neste caso, *outliers*. Estes *outliers* devem, portanto, ser identificados e, para tal, utilizou-se a ferramenta estatística *Box Plot* para os identificar através de uma análise dos dados [21], [98]. De modo a facilitar esta identificação de *outliers*, foi usada a escala de impacto que avalia de modo diferente valores na ordem dos milhares (Tabela 23), e valores na ordem das centenas, dezenas e unidades (Tabela 24).

Tabela 23 - Impacto dos resultados obtidos individualmente em relação à média, para resultados da ordem de grandeza dos milhares [21]

Variação	Impacto
0 – 1 %	Semelhante
2 – 3 %	Ligeiro
4 – 5 %	Significativo
> 5 %	Acentuado

Tabela 24 - Impacto dos resultados obtidos individualmente em relação à média, para resultados da ordem de grandeza das centenas, dezenas e unidades [21]

Variação	Impacto
0 – 10 %	Semelhante
11 – 20 %	Ligeiro
21 – 50 %	Significativo
> 51 %	Acentuado

5.2. RESULTADOS REFERENTES À CARACTERIZAÇÃO NO ESTADO FRESCO

5.2.1. CONSISTÊNCIA POR ESPALHAMENTO

O procedimento de ensaio seguido para a determinação da consistência por espalhamento da pasta cimentícia no estado fresco encontra-se descrito em 4.6.1. Este ensaio permite avaliar a trabalhabilidade e a fluidez de cada argamassa elaborada.

Os valores obtidos para o espalhamento médio referem-se ao valor médio obtido para cada amassadura efetuada. A Tabela 25 e a Figura 46 apresentam estes dados, de forma organizada e sob a forma de gráfico, respetivamente.

Tabela 25 – Espalhamento médio da pasta cimentícia das amassaduras efetuadas

Argamassa	Espalhamento médio [mm]	Desv. P. [mm]	C.V.
REF	198,64	4,06	2,04
FC15	193,40	3,39	1,76
FC30	197,73	4,48	2,26
CV15	183,53	7,33	4,00
CV30	192,72	4,33	2,24
Desv. P. – Desvio padrão; C.V. – Coeficiente de variação			

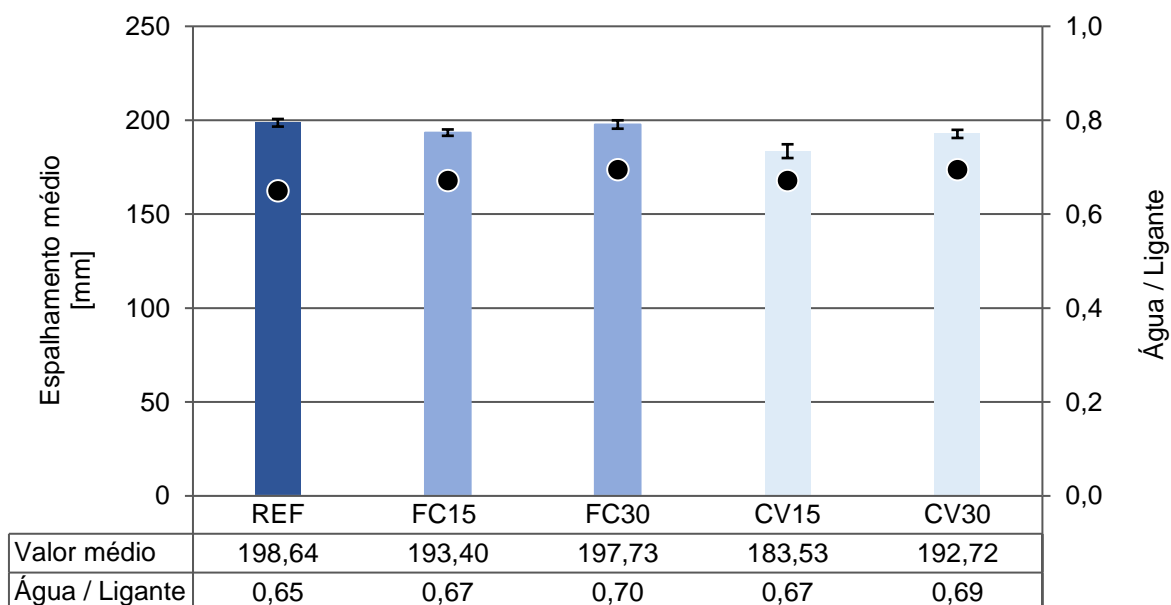


Figura 46 – Espalhamento médio da pasta cimentícia das amassaduras efetuadas

Neste ensaio importa lembrar que a quantidade de água utilizada na produção das diferentes argamassas se mantém igual, apenas varia a relação água/ligante (A/L) cujos valores se encontram expostos na Tabela 18 do capítulo 4.3.

Observou-se que a argamassa de referência obteve um espalhamento médio ligeiramente superior em comparação com as restantes argamassas, ainda que estas apresentem uma razão A/L ligeiramente superior. Dada a maior superfície específica do fíler calcário e da cinza volante, estes requerem uma maior quantidade de água de amassadura para iguais condições de consistência.

Para as argamassas com a substituição do cimento, observou-se em ambos os casos, para o fíler calcário e para a cinza volante, que as misturas com substituição de 30% apresentam um espalhamento médio ligeiramente superior às misturas com substituição de 15%. Esta situação deve-se ao facto de as misturas com substituição de 30%, apresentarem uma relação água/ligante superior às misturas com substituição de 15% ($A/L=0,70$ e $A/L=0,67$, respetivamente).

Ainda assim, e relativamente à argamassa de referência, considera-se, de acordo com o estipulado na Tabela 23, que os valores de espalhamento obtidos são semelhantes, já que diferem, no máximo, 8%.

Por fim, de acordo com a EN 1015-2:1998 [80] e para argamassas de revestimento, é estabelecido como valor de espalhamento aceitável o valor de 175 ± 10 mm. Ao observar as consistências obtidas, observa-se que a argamassa CV15 obteve um espalhamento médio mais próximo deste valor, com uma diferença inferior a 1%.

5.2.2. MASSA VOLÚMICA APARENTE

O procedimento de ensaio seguido para a determinação da massa volúmica aparente da pasta cimentícia no estado fresco encontra-se descrito no capítulo 4.6.2 e permite avaliar o grau de compacidade bem como o arranjo dos diferentes componentes na argamassa.

Este procedimento foi realizado por diversas vezes, ou seja, para cada amassadura efetuada. Na Tabela 26 constam os valores médios obtidos para cada argamassa e a Figura 47 apresenta estes dados sob a forma de gráfico.

Tabela 26 – Valores médios da massa volúmica no estado fresco das amassaduras efetuadas

Argamassa	M.V. Est. Fresco [kg/m ³]	Desv. P. [kg/m ³]	C.V.
REF	2036,95	4,98	0,24
FC15	2095,80	20,56	0,98
FC30	2073,45	4,17	0,20
CV15	2120,52	1,34	0,06
CV30	2127,17	3,94	0,19
M.V. Est. Fresco - Massa volúmica da argamassa no estado fresco			
Desv. P. – Desvio padrão; C.V. – Coeficiente de variação			

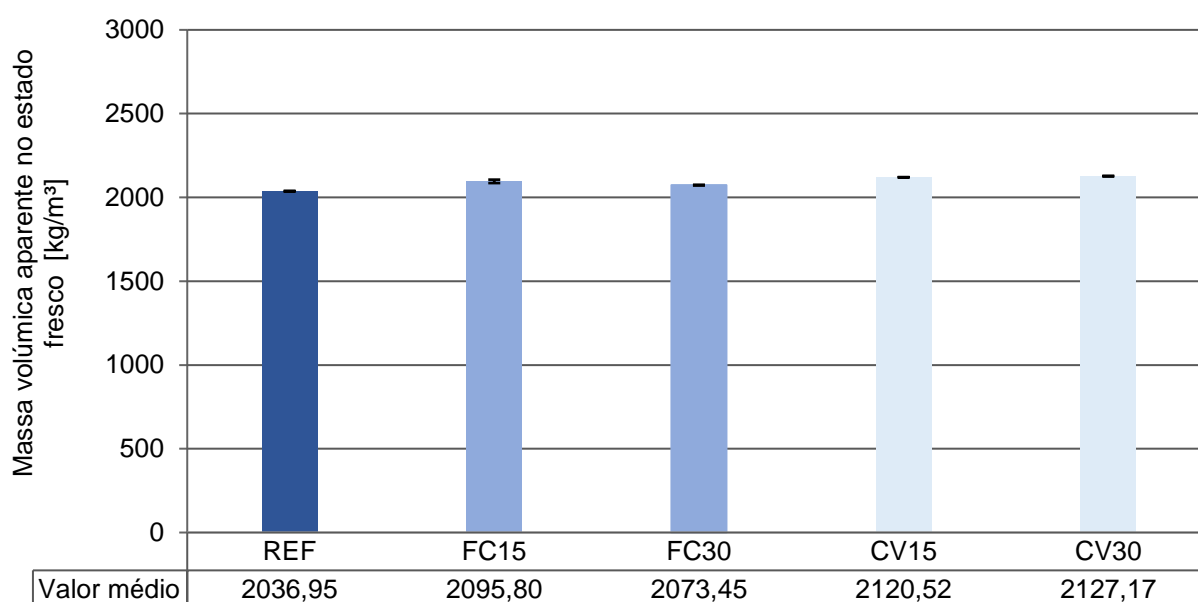


Figura 47 – Valores médios da massa volúmica no estado fresco das amassaduras efetuadas

Após uma análise dos dados obtidos, verificou-se que, comparadas com a argamassa de referência, as massas volúmicas aparentes das argamassas com substituição de cimento por fíler calcário são ligeiramente superiores e que as massas volúmicas aparentes das argamassas com substituição de cimento por cinza volante apresentam uma diferença considerada significativa, já que se vêm aumentadas em 4%. Este aumento da massa volúmica explica-se, em parte, pelo melhor arranjo do esqueleto sólido das argamassas com substituição de cimento.

5.2.3. TEOR DE AR

O procedimento de ensaio seguido para a determinação do teor de ar da pasta cimentícia no estado fresco encontra-se descrito em 4.6.3. Este ensaio foi efetuado para cada tipo de argamassa, apenas uma vez.

Na Tabela 27, encontram-se expostos os valores do teor de ar obtidos, para cada tipo de argamassa em análise.

Tabela 27 - Valores obtidos para o teor de ar no estado fresco das amassaduras efetuadas

Argamassa	Teor de ar [%]
REF	9,2
FC15	7,6
FC30	9,5
CV15	5,8
CV30	3,9

O procedimento de ensaio apesar de ser simples, em teoria, a sua execução prática apresenta alguns desafios à concretização do ensaio. Um desses desafios está associado ao procedimento de compactação com auxílio do varão metálico, tornando difícil garantir uma compactação exatamente igual para todas as argamassas. Apesar de se ter procedido a uma limpeza muito rigorosa das extremidades do balde do aparelho, há sempre algum resíduo que porque passar impercetível fazendo com que não ocorra uma aderência perfeita entre o mesmo e a borracha, aquando o fecho do mesmo. Por último, não é possível garantir, a 100%, que não ficou retida nenhuma bolha no sistema de válvulas aquando o procedimento.

Tendo em conta os desafios associados à execução deste ensaio e os valores obtidos tornou-se necessário perceber se para argamassas com razões A/L e espalhamento que se obtiveram, os valores obtidos para o teor de ar são aceitáveis.

Apesar de estar a analisar de cal aérea e metacaulino, Mergulhão D. [99] obteve valores para o ensaio do teor de ar por volta dos 8% e 10%, para razões A/L de 0,6 e 1, bem como espalhamentos médios entre os 168 e 167 mm, respetivamente.

Assim, observa-se que os valores que constam na Tabela 27, foram inferiores aos obtidos pelo autor, principalmente nas argamassas com substituição parcial de cimento por cinza volante.

5.3. RESULTADOS REFERENTES À CARACTERIZAÇÃO NO ESTADO ENDURECIDO

5.3.1. OBSERVAÇÃO DA RETRAÇÃO NO MOLDE

Tal como foi explicado em 4.10.1, a observação de retração no molde foi feita imediatamente antes de efetuar a desmoldagem dos provetes, aos 3 dias de idade.

Através de uma inspeção visual não foi possível observar ocorrência de retração, para qualquer uma das argamassas, nos 3 dias após a sua produção. Dá-se, como exemplo, alguns provetes da argamassa REF (Figura 48a) e da argamassa CV30 (Figura 48b) ainda no molde, imediatamente antes da desmoldagem.



Figura 48 - Observação de retração nos provetes da argamassa REF (a) e da argamassa CV30 (b) imediatamente antes da desmoldagem dos mesmos

5.3.2. VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ULTRASSONS E MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO

O procedimento de ensaio seguido para a medição da velocidade de propagação de ultrassons e a determinação do módulo de elasticidade dinâmico encontra-se descrito em 4.10.2. Neste procedimento provoca-se e mede-se a passagem de uma onda ultrassónica entre os dois transdutores localizados nas extremidades do provete. A medição da velocidade de propagação de ultrassons foi feita aos 28 dias, monitorizada de 15 em 15 dias até aos 120

dias. Esta monitorização teve como objetivo avaliar o desenvolvimento da estrutura interna do provete, sob as mesmas condições de cura, em provetes húmidos.

Conforme se observa na Tabela 28, para além de se fazer a medição em provetes danificados (D) e em provetes não danificados (ND), esta foi feita também para provetes húmidos (H) e para provetes secos (S). A medição da velocidade de propagação de ultrassons em provetes húmidos e em provetes secos, teve como objetivo avaliar a influência do teor de humidade na velocidade de propagação da onda.

Tabela 28 – Valor médio da velocidade de propagação de ultrassons dos provetes danificados e não danificados, aos 28 e aos 120 dias

Idade		28 dias			120 dias		
Argamassa	Provetes	V. ultra. [km/s]	Desv. P. [km/s]	C.V.	V. ultra. [km/s]	Desv. P. [km/s]	C.V.
REF	ND-S	2,18	0,02	1,06	2,30	0,02	0,96
	D-S	2,18	0,05	2,38	2,30	0,03	1,41
	D-H	2,33	0,03	1,44	2,41	0,02	0,69
FC15	ND-S	2,22	0,04	1,72	2,32	0,03	1,10
	D-S	2,16	0,04	2,03	2,30	0,02	0,94
	D-H	2,25	0,04	1,82	2,38	0,01	0,59
FC30	ND-S	2,07	0,02	0,92	2,22	0,02	0,87
	D-S	1,98	0,03	1,63	2,19	0,02	0,80
	D-H	2,07	0,04	1,78	2,27	0,02	0,86
CV15	ND-S	2,21	0,04	1,69	2,30	0,02	0,99
	D-S	2,13	0,05	2,41	2,30	0,01	0,35
	D-H	2,26	0,06	2,45	2,42	0,01	0,46
CV30	ND-S	2,13	0,05	2,13	2,36	0,02	0,79
	D-S	2,07	0,03	1,52	2,32	0,03	1,41
	D-H	2,19	0,03	1,43	2,42	0,01	0,56

ND – Provete não danificado; D – Provete danificado; S – Provete seco; H – Provete húmido
V. ultra. – Velocidade de propagação de ultrassons
Desv. P. – Desvio padrão; C.V. – Coeficiente de variação

Analisando o efeito da substituição de cimento por fíler calcário (Figura 49), com percentagens de substituição de 15% e 30% (provetes não danificados na condição de secos), verifica-se que a velocidade de propagação dos ultrassons (V. ultra.), aos 28 dias, obteve um aumento de 2% e uma diminuição de 5%, respetivamente. Assim, considera-se que as V. ultra. da argamassa REF e da FC15 e FC30 são semelhantes, de acordo com os critérios definidos na Tabela 24. Fazendo a mesma análise, agora, para os 120 dias de idade, pode-se concluir o

mesmo com a ressalva que na argamassa de referência, a V. ultra. se vê ligeiramente aumentada, cerca de 1%, para a argamassa FC15 e ligeiramente diminuída, cerca de 4%, para a argamassa FC30.

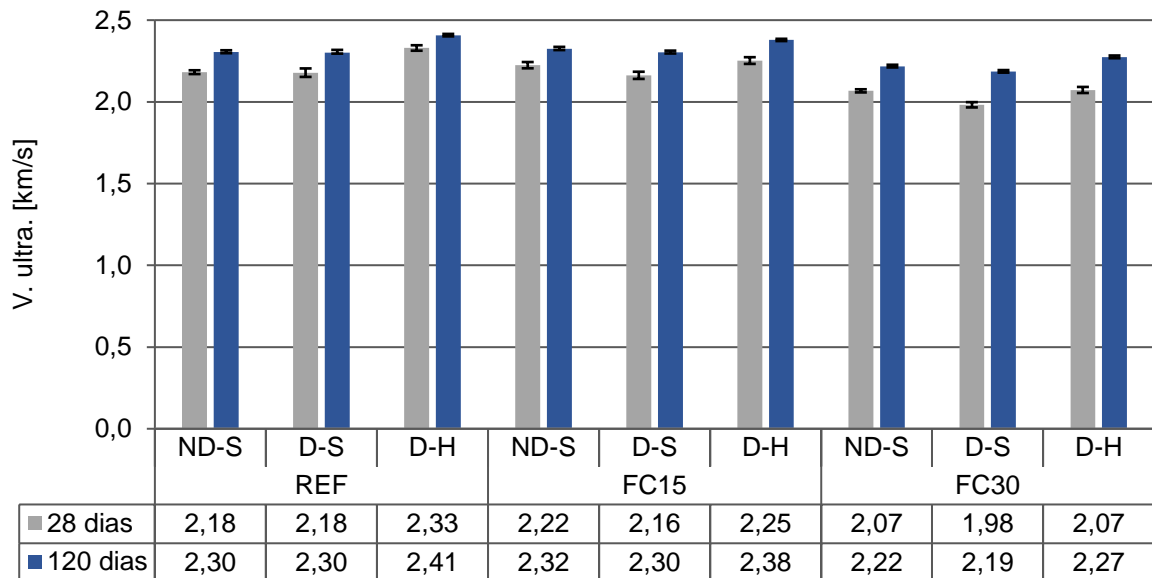


Figura 49 – Valor médio da velocidade de propagação de ultrassons dos provetes com filer calcário, danificados e não danificados, aos 28 e aos 120 dias

Relativamente ao dano provocado, tanto aos 28 como aos 120 dias de idade, apesar de na argamassa REF após dano se registar um valor médio da V. ultra. igual à da argamassa sem dano (diminuição inferior a 0,2%), nas argamassas com substituições parciais de cimento por filer calcário, verificou-se uma variação diferente. Aos 28 dias registaram-se diminuições da V. ultra. mais acentuadas FC15 (3%) e FC30 (4%), comparativamente aos 120 dias FC15 (1%) e FC30 (1%).

A presença de água nos provetes das argamassas provocou um aumento no valor da V. ultra. tanto para aos 28 como aos 120 dias, como seria esperado. Estes aumentos foram de 7% (REF), 4% (FC15) e 5% (FC30) aos 28 dias e 5% (REF), 3% (FC15) e 4% (FC30) aos 120 dias.

É possível observar, dos 28 para os 120 dias, que há um aumento da V. ultra. em todas as argamassas. Na argamassa de referência este aumento é igual nos provetes secos danificados e não danificados (6%) e inferior nos provetes húmidos não danificados (3%). Nas argamassas com substituições parciais de cimento por filer calcário, observam-se aumentos mais expressivos nos provetes danificados secos (D-S) como húmidos (D-H) comparativamente aos provetes secos não danificados. A argamassa FC30 apresentou valores superiores (entre 7% a 10%) comparativamente à argamassa FC15 (4% a 6%).

Analizando o efeito da substituição de cimento por cinza volante (Figura 50), com percentagens de substituição de 15% e 30%, verifica-se que a velocidade de propagação dos ultrassons (V. ultra.), aos 28 dias, obteve um aumento de 1% e uma diminuição de 3%, respetivamente (provetes sem dano na condição de secos). Assim, considera-se que as V. ultra. da argamassa REF e da CV15 e CV30 são semelhantes, de acordo com os critérios definidos na Tabela 24. Fazendo a mesma análise, agora, para os 120 dias de idade, registou-se um aumento da V. ultra. para a argamassa CV30, na ordem dos 2%, e quanto à argamassa CV15, esta manteve igual a V. ultra. em comparação com a argamassa de REF, através de diminuição inferior a 0,4%.

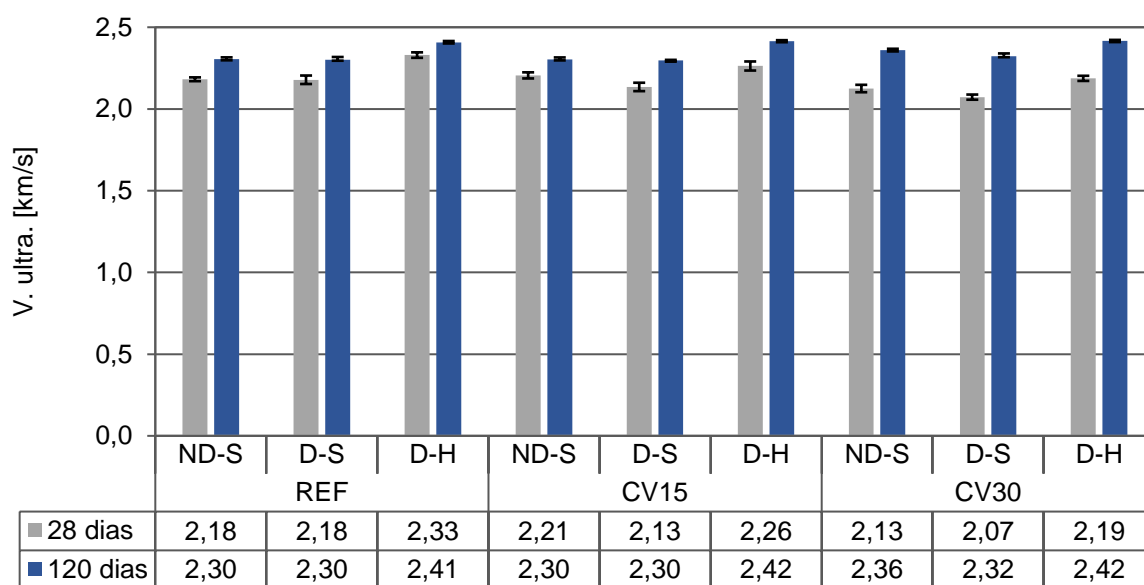


Figura 50 - Valor médio da velocidade de propagação de ultrassons dos provetes com cinza volante, danificados e não danificados, aos 28 e aos 120 dias

Relativamente ao dano provocado, tanto aos 28 como aos 120 dias de idade, apesar de na argamassa REF após dano, se registar um valor médio da V. ultra. igual à da argamassa sem dano (variação inferior a 0,5%), nas argamassas com substituições parciais de cimento por cinza volante, verificou-se uma tendência diferente. Aos 28 dias registaram-se diminuições da V. ultra. mais acentuadas CV15 (3%) e CV30 (2%), comparativamente aos 120 dias - CV15 (variação inferior a 0,5%) e CV30 (2%).

A presença de água nos provetes das argamassas provocou um aumento no valor da V. ultra. tanto aos 28 como aos 120 dias, como esperado. Aos 28 dias a argamassa de REF registou um aumento de 7% e as argamassas do tipo CV obtiveram valores da V. ultra. inferiores relativamente à argamassa REF, 6% para ambas. O mesmo foi observado aos 120 dias, com aumentos ligeiramente inferiores aos registados aos 28 dias, nomeadamente 5% (CV15 e REF) e 4% (CV30).

É possível observar, dos 28 para os 120 dias, que há um aumento da V. ultra. em todas as argamassas. Na argamassa de referência este aumento é igual, para os provetes secos danificados e não danificados (6%) e inferior nos provetes húmidos danificados (3%). Nas argamassas com substituições parciais de cimento por cinza volante, observam-se aumentos mais expressivos nos provetes danificados secos (D-S) como húmidos (D-H) comparativamente aos provetes secos não danificados. A argamassa CV30 apresentou valores superiores (entre 10% a 12%) comparativamente à argamassa CV15 (4% a 8%).

Conforme descrito em 4.10.2, a partir dos valores obtidos da velocidade de propagação de ultrassons, obtém-se o valor do módulo de elasticidade. Este parâmetro está relacionado com a deformabilidade e quanto maior for o seu valor, menos deformável será a argamassa.

Tabela 29 – Valor médio do módulo de elasticidade dos provetes danificados e não danificados, aos 28 e aos 120 dias

Idade		28 dias			120 dias		
Argamassa	Provetes	Ed. [GPa]	Desv. P. [GPa]	C.V.	Ed. [GPa]	Desv. P. [GPa]	C.V.
REF	ND	9,28	0,20	2,10	10,51	0,20	1,94
	D	9,33	0,45	4,78	10,52	0,30	2,82
FC15	ND	9,84	0,34	3,45	10,94	0,24	2,20
	D	9,22	0,38	4,08	10,63	0,20	1,88
FC30	ND	8,32	0,15	1,84	9,72	0,17	1,74
	D	7,65	0,25	3,26	9,47	0,15	1,60
CV15	ND	9,86	0,33	3,38	10,72	0,21	1,98
	D	9,06	0,43	4,77	10,64	0,07	0,70
CV30	ND	9,03	0,38	4,27	11,47	0,18	1,58
	D	8,57	0,26	3,05	11,01	0,31	2,81
ND – Provete não danificado; D – Provete danificado; Ed. – Módulo de elasticidade dinâmico Desv. P. – Desvio padrão; C.V. – Coeficiente de variação							

Analisando o efeito da substituição de cimento por fíler calcário, com percentagens de 15% e 30%, verifica-se que o valor médio do módulo dinâmico de elasticidade (Ed.), aos 28 dias sofreu um aumento de 6% para a argamassa FC15 e uma diminuição de 10% para a argamassa FC30. De acordo com o definido na Tabela 24, considera-se que os valores são semelhantes ao da argamassa de REF. Efetuando esta mesma análise aos 120 dias, observa-se o mesmo comportamento, mas com valores percentuais diferentes, aumento de 4% para a argamassa FC15 e um aumento de 10% para a argamassa FC30.

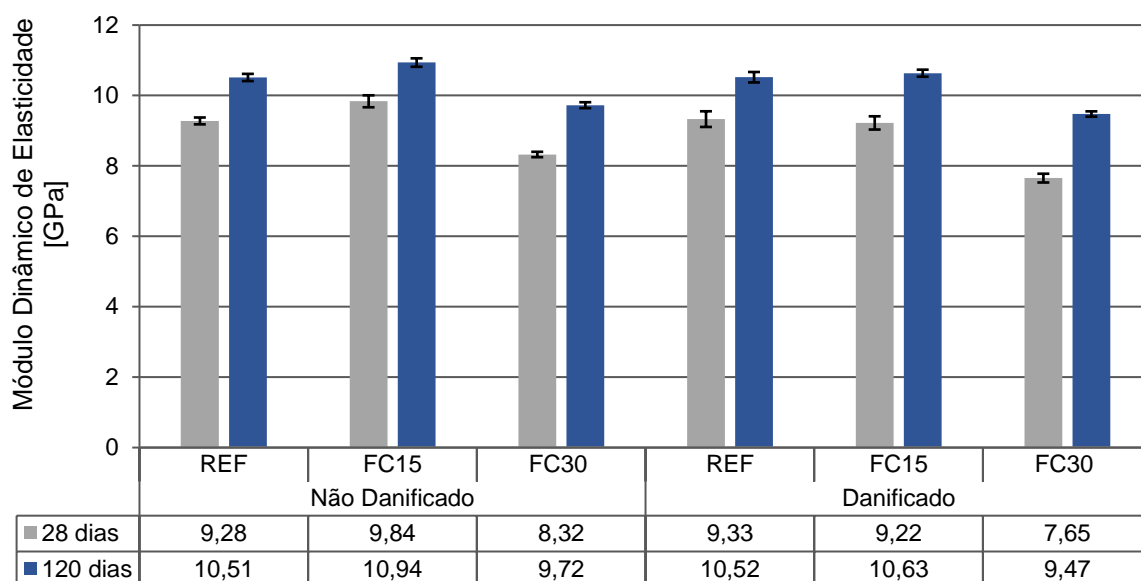


Figura 51 - Valor médio do módulo de elasticidade dos provetes com fíler calcário, danificados e não danificados, aos 28 e aos 120 dias

Analisando, o efeito do dano provocado, observou-se que tanto aos 28 como aos 120 dias a argamassa de REF não obteve qualquer variação do módulo dinâmico de elasticidade. Por outro lado, a argamassa do tipo FC15 obteve um aumento do módulo dinâmico de elasticidade tanto aos 28 dias, como aos 120 dias (6% e 4%, respetivamente). Quanto à argamassa FC30, registou-se uma diminuição do módulo dinâmico de elasticidade de 8% aos 28 dias e uma diminuição de 3% aos 120 dias.

Dos 28 para os 120 dias de idade, observa-se um aumento do módulo de elasticidade para todas as argamassas representadas no gráfico da Figura 51, obtendo valores semelhantes para ambos os provetes da argamassa REF (13%), um aumento significativo nos provetes danificados da argamassa FC30 (24%) e aumentos ligeiros nos restantes provetes, na ordem dos 14%.

Analisando o efeito da substituição de cimento por cinza volante (Figura 52), com percentagens de 15% e 30%, verifica-se que o valor médio do módulo dinâmico de elasticidade (Ed.), aos 28 dias sofreu um aumento de 6% para a argamassa CV15 e uma diminuição de 3% para a argamassa CV30. De acordo com a Tabela 24, considera-se que os valores são semelhantes ao da argamassa de REF. Efetuando esta mesma análise aos 120 dias, observa-se o mesmo comportamento, mas com valores percentuais diferentes, aumento de 2% para a argamassa CV15 e um aumento de 9% para a argamassa CV30.

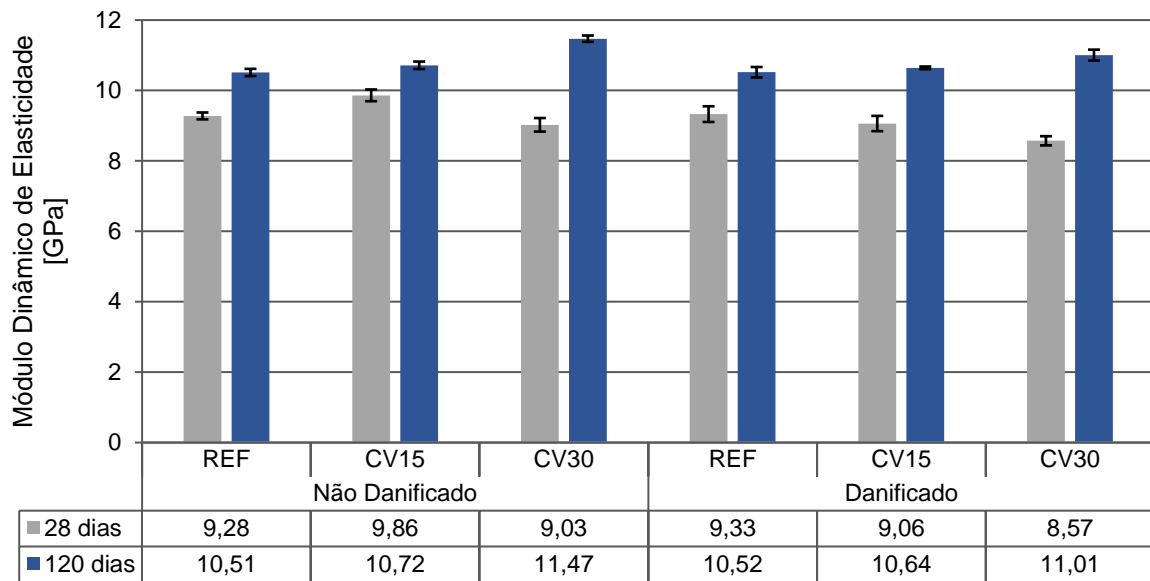


Figura 52 - Valor médio do módulo de elasticidade dos provetes com cinza volante, danificados e não danificados, aos 28 e aos 120 dias

Analisando o efeito do dano provocado, observou-se que, tanto aos 28 como aos 120 dias, a argamassa de REF obteve variações do módulo dinâmico de elasticidade inferiores a 1%. Por outro lado, as argamassas do tipo FC15 e FC30 obtiveram, uma diminuição do módulo dinâmico de elasticidade de 6% e 8% aos 28 dias e uma diminuição de 3%, para ambas, aos 120 dias.

Dos 28 para os 120 dias de idade, observa-se um aumento do módulo de elasticidade para todas as argamassas representadas no gráfico da Figura 52, obtendo valores ligeiramente superiores para os provetes da argamassa REF (13%), e um aumento significativo em todos os provetes da argamassa CV30, ND (27%) e D (28%). Para os provetes não danificados da argamassa CV15, obteve-se um impacto semelhante através de uma variação de 9%, ao contrário dos provetes danificados, nos quais se registou um aumento ligeiro de 17%.

Na Figura 53 apresenta-se a compilação dos valores médios de 6 medições obtidos durante a monitorização da velocidade de propagação de ultrassons (V. ultra.), realizada de 15 em 15 dias, nos provetes húmidos, de referência e com substituição parcial do cimento por filer calcário. Destas 6 medições, o primeiro valor da monitorização M1, corresponde aos valores obtidos aos 28 dias de idade, a segunda medição M2, foi feita 15 dias depois e por aí adiante até à última medição, M6, aos 120 dias de idade.

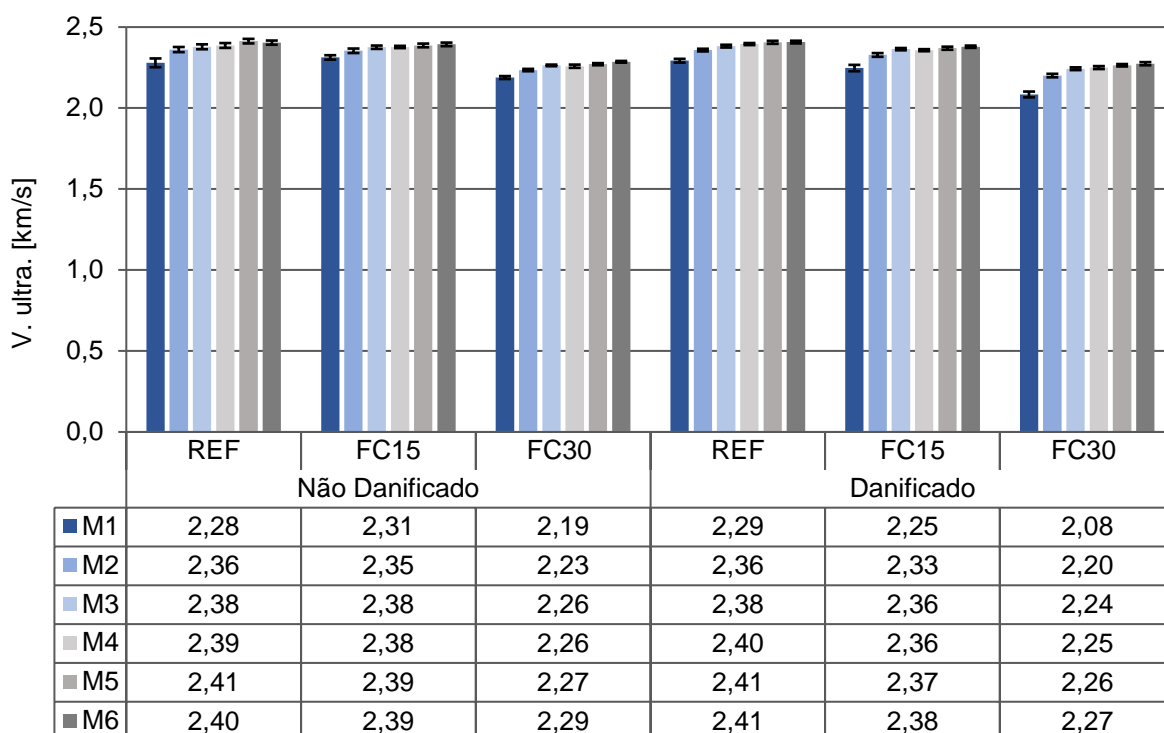


Figura 53 - Monitorização do valor médio da velocidade de propagação dos ultrassons nos provetes húmidos, com fíler calcário, danificados e não danificados

Analisando o efeito da substituição de cimento por fíler calcário, com percentagens de substituição de 15% e 30%, verifica-se que a V. ultra., na primeira leitura (M1) se viu aumentada em 1% e diminuída 4%, respetivamente. Na última leitura (M6), a V. ultra. para a argamassa FC15 não sofre variação face à argamassa REF, enquanto que a argamassa FC30 regista uma diminuição da mesma em 5%.

Quanto ao dano provocado, na medição M1, observa-se que os provetes danificados da argamassa de REF apresentaram um aumento muito pequeno (1%) na V. ultra., face aos provetes não danificados, obtendo-se em valores iguais na medição M6. Nas argamassas do tipo FC, na medição M1 observou-se uma diminuição de 3% (FC15) e de 5% da V. ultra. face aos provetes não danificados. Porém, na medição M6, a variação do valor da V. ultra. é mínima, sendo inferior a 1%.

Importa relembrar que se entende a medição da V. ultra. como uma ferramenta para avaliar a densificação da estrutura interna das argamassas e, como tal, importa analisar os ganhos obtidos dos 28 dias para os 120 dias de idade. Importa, também, perceber como foi esta evolução nos provetes danificados e compará-la com os provetes que não foram alvo de dano. Houve a intenção de usar este método para monitorizar o eventual efeito de autorregeneração.

Assim, dos 28 para os 120 dias, ou seja, da medição M1 para a medição M6, verifica-se um aumento da V. ultra. em todas as argamassas em análise. Este aumento é igual para a argamassa REF (5%) e difere entre provetes não danificados e provetes danificados para argamassa FC15 (15% e 6%, respetivamente) e para a argamassa FC30 (4% e 9%, respetivamente).

No gráfico da Figura 54 apresenta-se a compilação dos dados obtidos durante a monitorização da velocidade de propagação de ultrassons (V. ultra.), realizada de 15 em 15 dias, nos provetes húmidos, de referência e com substituição parcial do cimento por cinza volante.

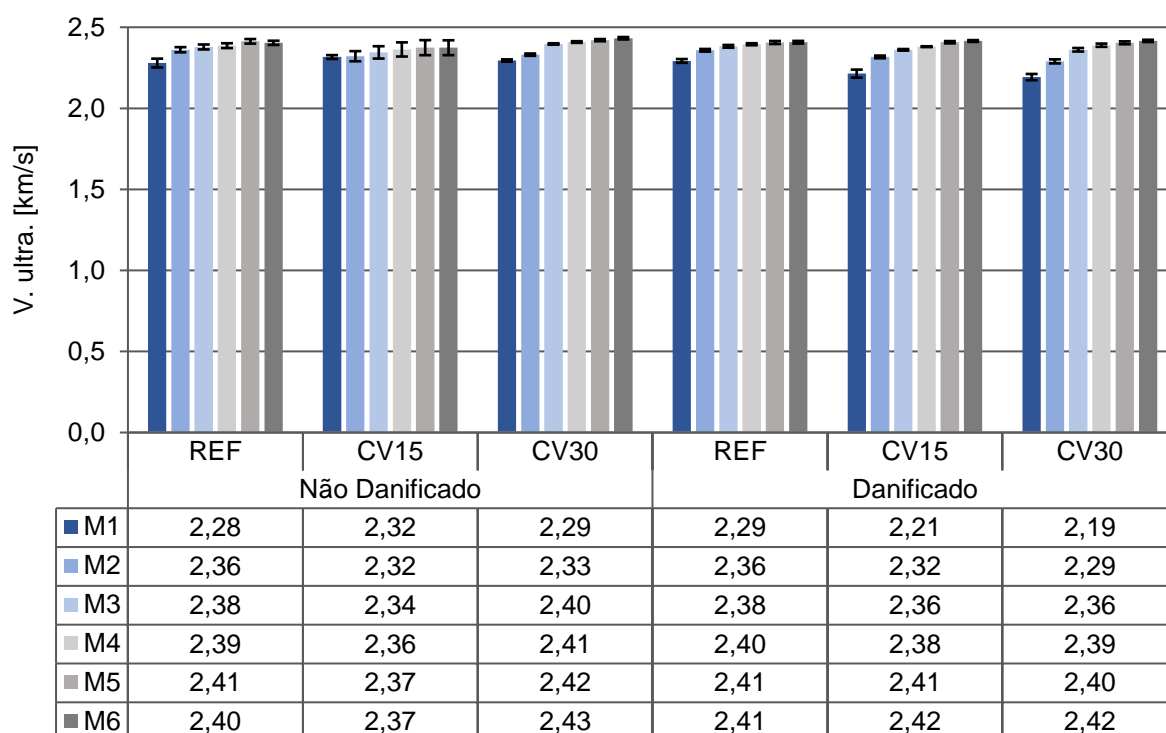


Figura 54 - Monitorização do valor médio da velocidade de propagação dos ultrassons nos provetes húmidos, com cinza volante, danificados e não danificados

Analisando o efeito da substituição de cimento por cinza volante, verifica-se que a V. ultra., na primeira leitura (M1), se viu aumentada em 2% e 1%, respetivamente. Na última leitura (M6) obtiveram-se variações inferiores a 1% para ambas as argamassas do tipo CV, face à argamassa REF.

Quanto ao dano provocado, na medição M1, observa-se que os provetes danificados da argamassa de REF apresentaram um aumento muito pequeno (1%) na V. ultra., face aos provetes não danificados, obtendo-se em valores iguais na medição M6. Nas argamassas do tipo CV, na medição M1 verificou-se, para ambas, uma diminuição da V. ultra. de 4%, face

aos provetes não danificados. Porém, na medição M6, a V. ultra. apresenta um aumento de 2% da V. ultra. na argamassa CV15, e uma diminuição de 1% na argamassa CV30.

Dos 28 para os 120 dias, ou seja, da medição M1 para a medição M6, verifica-se um aumento da V. ultra. em todas as argamassas em análise. Este aumento é igual para a argamassa REF (5%) e difere entre provetes não danificados e provetes danificados para argamassa CV15 (2% e 9%, respetivamente) e para a argamassa CV30 (6% e 10%, respetivamente).

5.3.3. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR FLEXÃO

A avaliação deste parâmetro vai permitir analisar a contribuição, de cada adição na substituição parcial do cimento, para a durabilidade da argamassa. O procedimento de ensaio seguido para a determinação da resistência à tração por flexão encontra-se descrito em 4.10.3 e foi realizado aos 28 e aos 120 dias.

A Tabela 30 apresenta os valores médios obtidos a partir do ensaio, o desvio padrão e o respetivo coeficiente de variação. Estes parâmetros são ainda representados de forma gráfica nas Figura 55 e Figura 56.

Tabela 30 – Valores médios da resistência à tração por flexão, desvio padrão e coeficiente de variação, aos 28 e aos 120 dias

Idade		28 dias			120 dias		
Argamassa	Provetes	R.T. [MPa]	Desv. P. [MPa]	C.V.	R.T. [MPa]	Desv. P. [MPa]	C.V.
REF	ND	4,411	0,17	3,92	6,222	0,45	7,24
	D	4,520	0,38	8,33	5,962	0,39	6,57
FC15	ND	3,826	0,44	11,63	5,299	0,29	5,52
	D	4,258	0,40	9,49	5,188	0,34	6,55
FC30	ND	2,837	0,22	7,92	3,940	0,22	5,50
	D	2,901	0,32	11,15	3,654	0,36	9,81
CV15	ND	4,031	0,32	7,90	5,915	0,41	6,94
	D	4,113	0,45	11,01	6,287	0,63	10,04
CV30	ND	4,077	0,19	4,72	4,054	0,17	4,23
	D	4,228	0,26	6,05	5,316	0,89	16,78
ND – Provede não danificado; D – Provede danificado							
R.T. - Resistência à tração por flexão							
Desv. P. – Desvio padrão; C.V. – Coeficiente de variação							

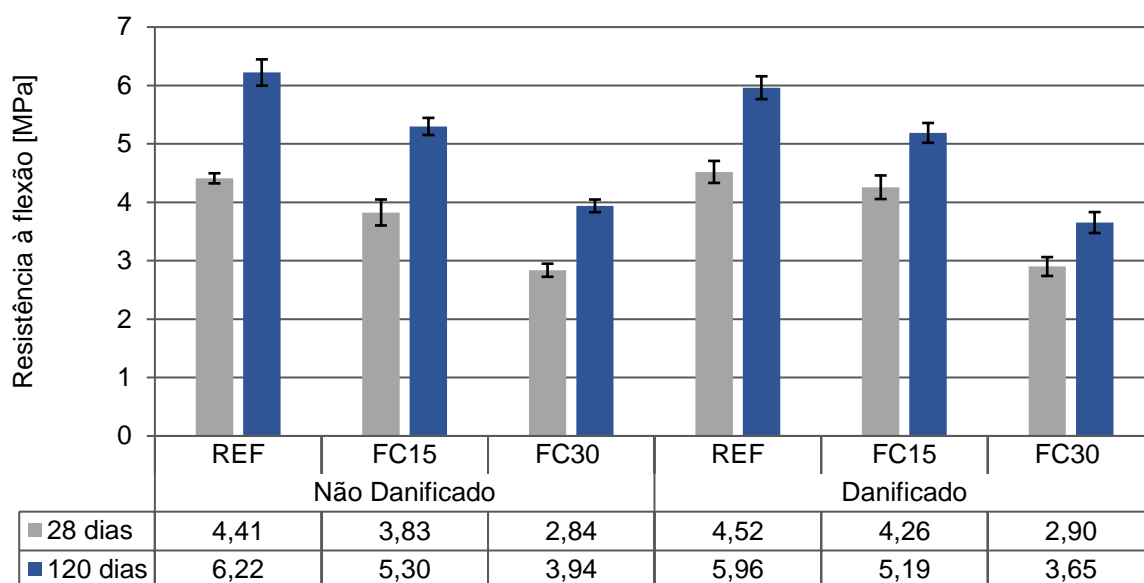


Figura 55 – Valores médios da resistência à tração por flexão dos provetes com fíler calcário, danificados e não danificados, aos 28 e aos 120 dias

Analisando o efeito da substituição de cimento por fíler calcário, com percentagens de substituição de 15% e 30%, verifica-se que a resistência à tração por flexão, aos 28 dias de idade diminuiu em 13% e 36%, respetivamente. Assim, considera-se que a resistência à flexão da argamassa FC15 é ligeiramente inferior à da argamassa REF, enquanto que na argamassa FC30 se deu uma diminuição significativa deste valor, de acordo com os critérios definidos na Tabela 24. Fazendo a mesma análise, agora, para os 120 dias de idade, pode-se concluir que, relativamente à argamassa REF, a argamassa FC15 apresenta diminuição ligeira da resistência à tração por flexão de cerca de 15%. Já a argamassa FC30 apresenta uma diminuição significativa, na ordem dos 37%.

Relativamente ao dano provocado, e para os 28 dias de idade, a argamassa de referência após dano registou uma resistência à tração semelhante (aumento de 2%) à da argamassa sem dano. Já as argamassas com substituição de cimento por fíler calcário, viram as resistências à tração aumentar de um modo mais significativo para argamassa FC15 e ligeiro para a argamassa FC30 (11% e 2%, respetivamente).

Os dados permitem, também, constatar que, dos 28 dias para os 120 dias de idade, há um aumento significativo da resistência à tração por flexão em todas as argamassas. Este aumento é superior nas argamassas não danificadas do tipo FC (39%) do que nas argamassas danificadas (22 a 26%). A argamassa de referência registou um aumento da resistência à flexão igualmente significativo para os provetes danificados e para os provetes não danificados de 32% e 41%, respetivamente.

Analizando o efeito da substituição de cimento por cinza volante, com percentagens de substituição de 15% e 30%, verifica-se que a resistência à tração por flexão, aos 28 dias de idade, se viu diminuída em 9% e 8%, respetivamente (Figura 56). Assim, considera-se que a resistências à flexão das argamassas CV15 e CV30 apresentaram valores semelhantes resistência à flexão da argamassa REF, de acordo com os critérios definidos na Tabela 24. Fazendo a mesma análise, agora, para os 120 dias de idade, pode-se concluir que, relativamente à argamassa REF, a argamassa CV15 apresenta uma diminuição da resistência à flexão de cerca de 5%. Já a argamassa CV30 apresenta uma diminuição significativa, na ordem dos 36%.

Relativamente ao dano provocado, e para os 28 dias de idade, todas as argamassas representadas na Figura 56, registaram uma resistência à tração por flexão semelhante à da argamassa sem dano (variações inferiores a 4%), de acordo com os critérios definidos na Tabela 24. Aos 120 dias de idade, as argamassas REF e CV15 mantiveram uma resistência à flexão semelhante à respetiva argamassa sem dano. Já a argamassa CV 30 obteve um aumento significativo da resistência à flexão, cerca de 31%.

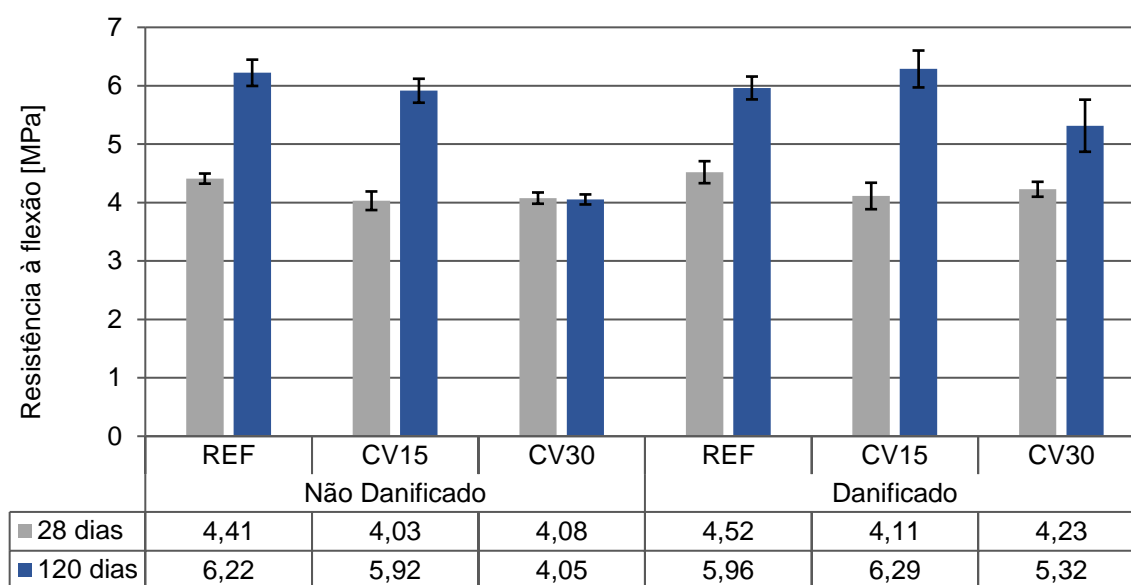


Figura 56 - Resistência à tração por flexão dos provetes com cinza volante, danificados e não danificados, aos 28 e aos 120 dias

Os dados permitem, também, constatar que, dos 28 dias para os 120 dias de idade, há um aumento da resistência à flexão em todas as argamassas, com exceção da argamassa CV30 sem dano. A argamassa CV30 sem dano obteve valor semelhante ao obtido aos 28 dias enquanto que a mesma argamassa com dano obteve um aumento significativo da resistência à flexão, cerca de 26%. Por outro lado, enquanto que a argamassa CV15 registou um aumento acentuado nos provetes danificados, observou-se um aumento inferior nos provetes não danificados, cerca de 53% e 47% respetivamente.

De acordo com Georgescu M. e Saca N. [38] a presença de cinza volante num cimento vai causar uma diminuição da sua resistência mecânica. Ainda segundo o mesmo [38], esta diminuição pode ser observada logo aos 28 dias. Este fenómeno reforça a participação da cinza volante no desenvolvimento da resistência, que através da sua reação pozolânica necessita de mais tempo para se desenvolver.

5.3.4. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

O procedimento de ensaio seguido para a determinação da resistência à compressão, encontra-se descrito em 4.10.4 e foi realizado aos 28 e aos 120 dias.

A Tabela 31 apresenta os valores médios obtidos, o desvio padrão e o respetivo coeficiente de variação. Estes parâmetros são ainda representados de forma gráfica nas Figura 57 e Figura 58.

Tabela 31 - Valores médios da resistência à compressão, desvio padrão e coeficiente de variação, aos 28 e aos 120 dias

Idade		28 dias			120 dias		
Argamassa	Provetes	R.C. [MPa]	Desv. P. [MPa]	C.V.	R.C. [MPa]	Desv. P. [MPa]	C.V.
REF	ND	15,89	0,36	2,29	22,28	1,59	7,13
	D	17,05	1,61	9,42	22,10	1,30	5,90
FC15	ND	14,72	1,39	9,47	20,33	1,17	5,76
	D	15,36	1,07	6,95	19,39	0,80	4,15
FC30	ND	10,51	0,26	2,47	14,65	0,59	4,06
	D	10,82	0,38	3,49	13,99	0,73	5,22
CV15	ND	15,15	0,91	6,04	23,39	1,69	7,21
	D	16,14	1,36	8,44	24,00	0,71	2,94
CV30	ND	14,47	1,08	7,44	23,04	0,50	2,18
	D	14,98	0,78	5,23	23,50	0,74	3,16

ND – Provete não danificado; D – Provete danificado
R.C. - Resistência à compressão; Desv. P. – Desvio padrão; C.V. – Coeficiente de variação

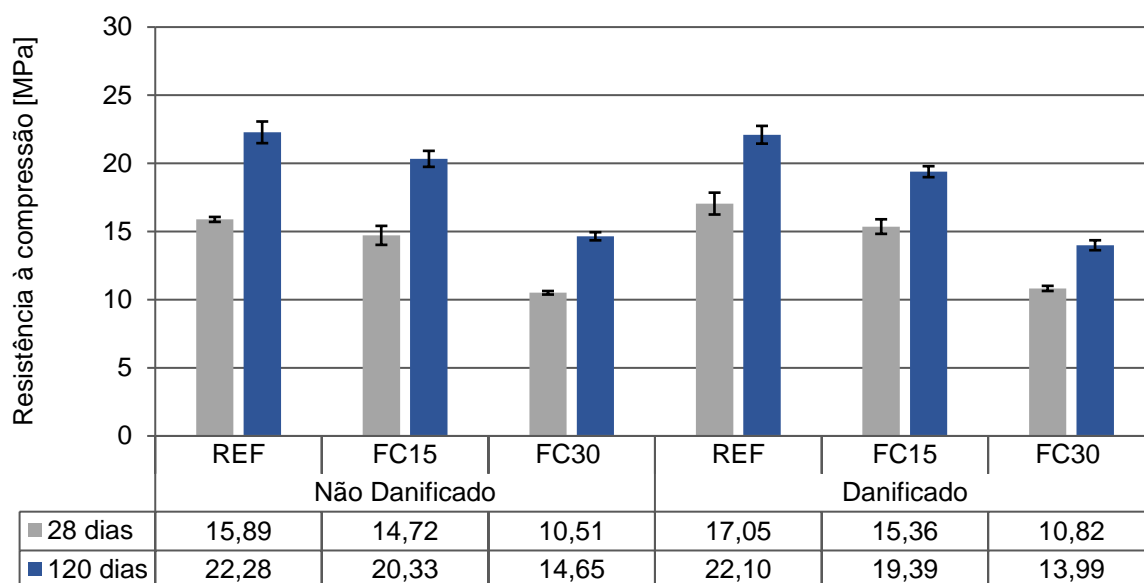


Figura 57 – Valores médios da resistência à compressão dos provetes com fíler calcário, danificados e não danificados, aos 28 e aos 120 dias

Analisando o efeito da substituição de cimento por fíler calcário, com percentagens de substituição de 15% e 30%, verifica-se que a resistência à compressão, aos 28 dias de idade se manteve semelhante na argamassa FC15 e registou-se uma diminuição significativa na argamassa FC30 (conforme os critérios definidos na Tabela 24). Fazendo a mesma análise, agora, para os 120 dias de idade, conclui-se que ambas as argamassas, FC15 e FC30, mantiveram o impacto de variações apresentadas nos 28 dias, atendendo que a argamassa FC15 manteve-se semelhante à argamassa de referência, e que se registou uma diminuição significativa na argamassa FC30, na ordem dos 34%.

De acordo com Georgescu M. e Saca N. [38] a presença de fíler calcário num cimento vai causar uma diminuição, significativa, da resistência à compressão face a um cimento de referência. Ainda de acordo com o mesmo, este fenómeno ocorre devido ao efeito de diluição que se dá, essencialmente, ao substituir parte do cimento por fíler calcário e que acaba por acelerar a hidratação do cimento. Segundo os autores Rodrigues P., Henriques F. et al [100] a presença de fíler calcário pode aumentar a resistência em idades iniciais, devido à aceleração da hidratação. Porém, segundo os mesmos [100], em idade avançada e devido ao efeito de diluição mencionado anteriormente, esta mistura apresenta menor resistência face à mistura de referência.

Este ponto de vista pode, assim, explicar os valores mais baixos obtidos na resistência mecânica em argamassas com fíler calcário face à argamassa de referência (cimento).

Relativamente ao dano provocado, e para os 28 dias de idade, as argamassas com substituição de cimento por fíler calcário mostraram resistências à compressão aumentadas

em 4% e 3% (FC15 e FC30, respetivamente). Aos 120 dias de idade, verifica-se uma diminuição da resistência à compressão inferior a 5% quando comparado o provete com dano com o provete sem dano das argamassas FC15 e FC30.

Os dados permitem, também, constatar que, dos 28 dias para os 120 dias de idade, há um aumento da resistência à compressão em todas as argamassas, como seria expectável. Este aumento é superior nas argamassas não danificadas do tipo FC15 e F30 (38 a 39%, respetivamente) do que nas argamassas danificadas (26 a 29%, respetivamente).

Este fenómeno aconteceu também na resistência à flexão dos provetes com fíler calcário e aqui, possivelmente, aplica-se a mesma justificação referente ao efeito de diluição provocado pela substituição de cimento por fíler calcário. Devido a este efeito, a resistência em idades mais tardias fica comprometida.

Analisando o efeito da substituição de cimento por cinza volante (Figura 58), com percentagens de substituição de 15% e 30%, verifica-se que a resistência à compressão, aos 28 dias de idade se viu diminuída em 5% e 9%, respetivamente. Deste modo, considera-se que as resistências à compressão da argamassa REF, CV15 e CV30 são semelhantes, de acordo com os critérios definidos na Tabela 24. Relativamente aos 120 dias de idade, pode-se concluir que, relativamente à argamassa REF, as argamassas CV15 e CV30 apresentam resistências à compressão semelhantes, atendendo à baixa percentagem de aumento (5% e 3%, respetivamente).

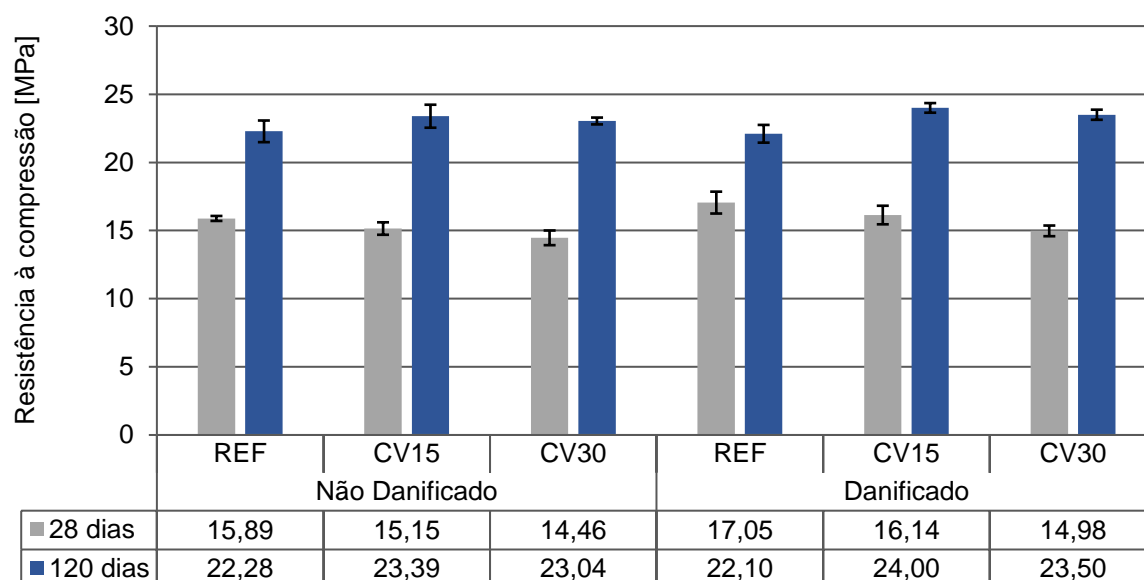


Figura 58 – Valores médios da resistência à compressão, dos provetes com cinza volante, danificados e não danificados, aos 28 e aos 120 dias

Relativamente ao dano provocado, e para os 28 dias de idade, a argamassa de referência após dano registou uma resistência à compressão semelhante (aumento de 7%) à da argamassa sem dano. Já as argamassas com substituição de cimento por cinza volante, viram as resistências à compressão aumentadas em 7% e 4% (CV15 e CV30, respetivamente). Aos 120 dias de idade, verifica-se que as resistências à compressão são semelhantes entre os provetes danificados e não danificados, para cada tipo de argamassa, com variações inferiores a 3%.

Os dados permitem, também, constatar que, dos 28 dias para os 120 dias de idade, há um aumento da resistência à compressão em todas as argamassas, conforme esperado. Este aumento é superior nas argamassas não danificadas do tipo CV (54 a 59%) do que nas argamassas danificadas (49 a 57%). A argamassa REF segue a mesma tendência.

Sabendo que a “reação” da cinza volante é mais lenta, isto pode justificar o aumento da resistência à compressão que se verificou.

O mesmo fenómeno foi observado pelos autores Na S., Hama Y., e Taniguchi M. et al. [69], ou seja, um aumento na resistência à compressão, nos provetes danificados (sujeitos a ciclos gelo/degelo com método de danificação) face aos provetes não danificados, em argamassas com cinza volante.

5.3.5. POROSIDADE ABERTA E MASSAS VOLÚMICAS

O ensaio da porosidade aberta permite avaliar a argamassa em termos da sua estrutura porosa. Esta avaliação da estrutura porosa permite determinar os poros presentes no interior da argamassa, a ligação entre os mesmos e também com o exterior.

O procedimento de ensaio encontra-se descrito em 4.10.6 e os valores médios, bem como o respetivo desvio padrão e coeficiente de variação, encontram-se na Tabela 32 e nos gráficos das Figura 59 e Figura 60.

Tabela 32 - Porosidade aberta dos provetes danificados e não danificados, aos 28 e aos 120 dias

Idade		28 dias			120 dias		
Argamassa	Provetes	P. Ab. [%]	Desv. P. [%]	C.V.	P. Ab. [%]	Desv. P. [%]	C.V.
REF	ND	22,74	0,21	0,92	18,47	0,32	1,74
	D	22,64	0,45	2,00	18,83	0,55	2,90
FC15	ND	20,12	1,02	5,09	15,64	1,07	6,84
	D	19,23	0,58	2,99	16,20	0,65	4,02
FC30	ND	23,09	0,98	4,25	18,47	1,07	5,78
	D	21,57	0,94	4,36	18,61	0,50	2,68
CV15	ND	19,43	0,88	4,52	18,97	0,40	2,11
	D	21,40	0,52	2,44	18,44	0,67	3,63
CV30	ND	20,72	1,55	7,50	14,70	0,74	5,02
	D	21,10	0,99	4,71	17,22	1,53	8,90

ND – Provete não danificado; D – Provete danificado

P. Ab. – Porosidade aberta; Desv. P. – Desvio padrão; C.V. – Coeficiente de variação

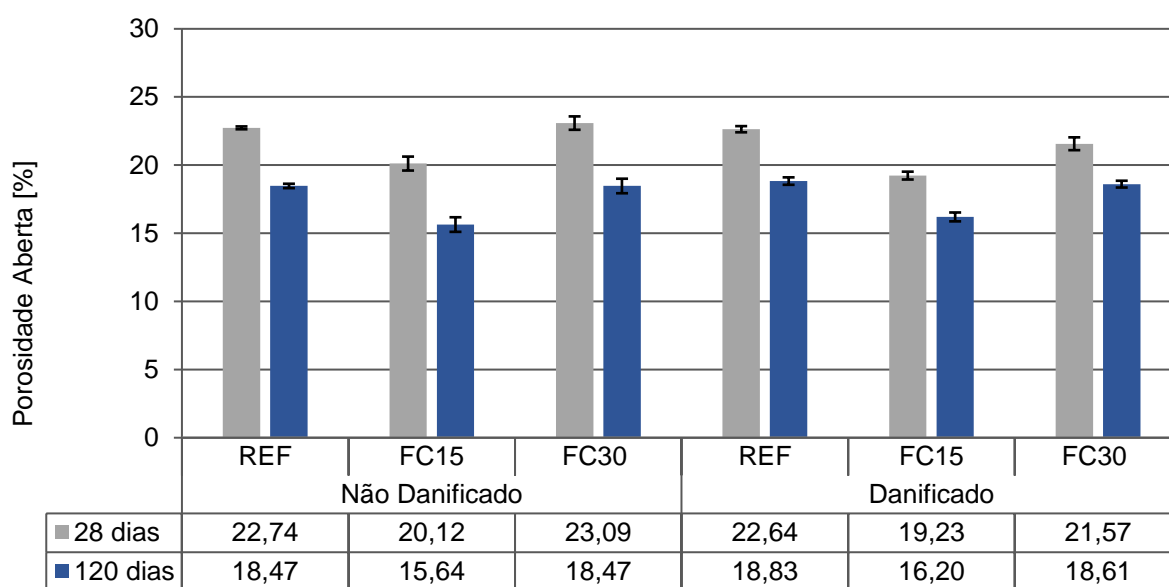


Figura 59 - Porosidade aberta dos provetes com fíler calcário, danificados e não danificados, aos 28 e aos 120 dias

Analizando o efeito da substituição de cimento por fíler calcário, com percentagens de substituição de 15% e 30%, verifica-se que a porosidade aberta, aos 28 dias, se viu diminuída em 12% para a argamassa FC15 e aumentada em 2% para a argamassa FC30. Assim, considera-se que a porosidade aberta da argamassa FC30 apresenta um valor semelhante, face à argamassa REF, enquanto que a argamassa FC15 sofreu uma diminuição ligeira, de acordo com os critérios definidos na Tabela 24. Procedendo à mesma análise, agora para os 120 dias de idade, pode-se concluir que, relativamente à argamassa REF, a argamassa FC15 apresenta uma diminuição ligeira da porosidade aberta, cerca de 15%. Por seu lado, a argamassa FC30 não registou qualquer variação.

Relativamente ao dano provocado, e para os 28 dias de idade, as argamassas com substituição de cimento por fíler calcário viram as porosidades abertas diminuídas em 4% e 7% (FC15 e FC30, respetivamente). Aos 120 dias de idade, verifica-se que as porosidades abertas das argamassas FC15 e FC30 são semelhantes entre os provetes danificados e não danificados, obtendo um aumento de 4% e 1%, respetivamente.

Os dados permitem, também, constatar que, dos 28 dias para os 120 dias de idade, há uma diminuição da porosidade aberta em todas as argamassas, como esperado. As argamassas obtiveram diminuição ligeira da porosidade aberta em todos os provetes, com e sem dano, com a exceção da argamassa FC15, cujos provetes sem dano obtiveram uma diminuição significativa da porosidade, correspondente a 22%.

De um modo geral, observa-se que tanto aos 28 como aos 120 dias, para os provetes com ou sem dano, as argamassas do tipo FC, apresentam uma menor percentagem de poros abertos ao exterior, comparativamente à argamassa REF.

Analizando o efeito da substituição de cimento por cinza volante (Figura 60), com percentagens de substituição de 15% e 30%, verifica-se que a porosidade aberta, aos 28 dias de idade se viu diminuída em 15% e 9%, respetivamente. Assim, considera-se que as porosidades abertas da argamassa REF e da CV30 são semelhantes e que argamassa CV15 viu uma diminuição ligeira da porosidade aberta, de acordo com os critérios definidos na Tabela 24. Fazendo a mesma análise, agora para os 120 dias de idade, pode-se concluir que, relativamente à argamassa REF, a argamassa CV15 apresenta um aumento de porosidade aberta de cerca de 3%. Já a argamassa CV30 apresenta uma ligeira diminuição, na ordem dos 20%.

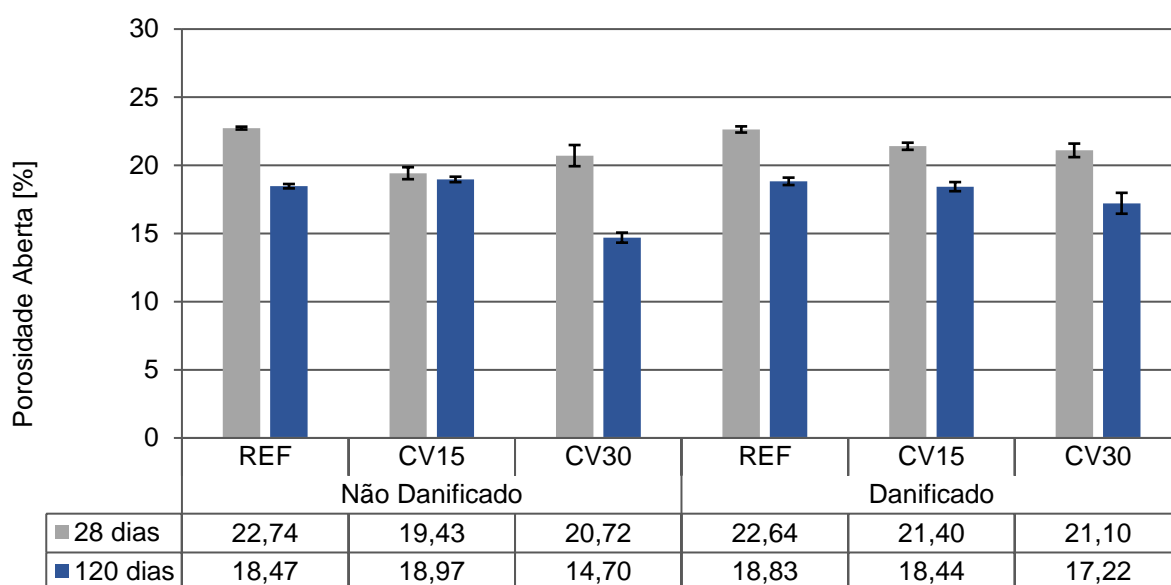


Figura 60 - Porosidade aberta dos provetes com cinza volante, danificados e não danificados, aos 28 e aos 120 dias

Relativamente ao dano provocado, e para os 28 dias de idade, as argamassas com substituição de cimento por cinza volante, viram as porosidades abertas aumentadas em 10% e 2% (CV15 e CV 30, respetivamente). Aos 120 dias de idade, verifica-se que as porosidades abertas são semelhantes entre os provetes danificados e não danificados, da argamassa de REF e da argamassa CV15. Na argamassa CV30 observou-se um aumento ligeiro da porosidade aberta (17%), de acordo com os critérios definidos na Tabela 24.

Os dados permitem, também, constatar que, dos 28 dias para os 120 dias de idade, há uma diminuição da porosidade aberta em todas as argamassas, conforme expectável. No caso das argamassas CV15, esta diminuição é superior nas argamassas com dano do que nas argamassas sem dano, (14% e 2% respetivamente). A argamassa de REF e a argamassa CV30 apresentam a tendência contrária, tendo obtido valores de 17% e 18% nos provetes com dano, e 19% e 29% nos provetes sem dano nas argamassas de REF e CV30, respetivamente.

A Tabela 33 apresenta os valores de massa volúmica aparente obtidos nos 5 tipos de argamassa obtidas. As Figura 61 e Figura 62 apresentam a representação gráfica deste parâmetro.

Tabela 33 - Valores médios da massa volúmica aparente dos provetes danificados e não danificados, aos 28 e aos 120 dias

Idade		28 dias			120 dias		
Argamassa	Provetes	M.V. Ap. [kg/m³]	Desv. P. [kg/m³]	C.V.	M.V. Ap. [kg/m³]	Desv. P. [kg/m³]	C.V.
REF	ND	1948,96	3,00	0,15	1979,21	5,03	0,25
	D	1964,60	5,65	0,29	1984,90	2,55	0,13
FC15	ND	1987,00	10,45	0,53	2025,13	10,06	0,50
	D	1971,39	12,70	0,64	2005,28	8,07	0,40
FC30	ND	1947,47	6,41	0,33	1977,84	23,14	1,17
	D	1947,49	5,76	0,30	1983,07	10,19	0,51
CV15	ND	2027,07	15,24	0,75	2018,68	13,88	0,69
	D	1987,66	16,95	0,85	2018,34	9,21	0,46
CV30	ND	1997,65	16,04	0,80	2018,68	7,60	0,37
	D	1995,32	5,97	0,30	2038,54	15,93	0,78
ND – Provete não danificado; D – Provete danificado							
M.V. Ap. – Massa volúmica aparente							
Desv. P. – Desvio padrão; C.V. – Coeficiente de variação							

Analisando o efeito da substituição de cimento por fíler calcário (Figura 61), com percentagens de substituição de 15% e 30%, verifica-se que a massa volúmica aparente, aos 28 dias de idade se viu aumentada em 2% para argamassa FC15 e não obteve qualquer variação para a argamassa FC30. Assim, considera-se que as massas volúmicas aparentes da argamassa REF e da FC30 são semelhantes e que argamassa FC15 viu um aumento ligeiro da massa volúmica aparente, de acordo com os critérios definidos na Tabela 23. Fazendo a mesma análise, agora, para os 120 dias de idade, pode-se concluir o mesmo, um aumento ligeiro para a argamassa FC15 (2%) e não obteve qualquer variação para a argamassa FC30, face à argamassa REF.

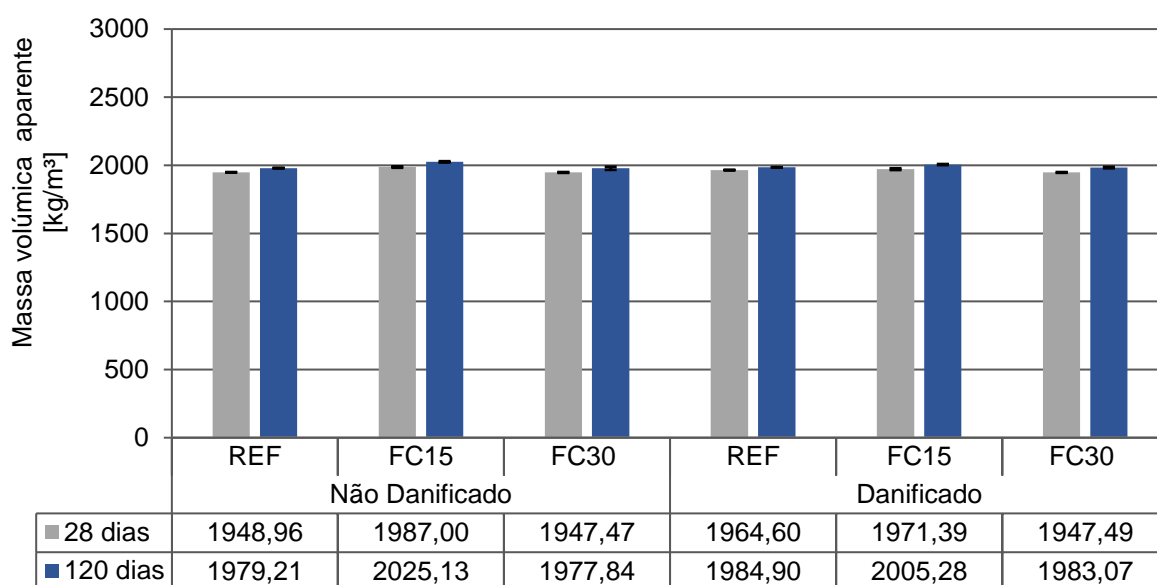


Figura 61 - Valores médios da massa volúmica aparente dos provetes com fíler calcário, danificados e não danificados, aos 28 e aos 120 dias

Relativamente ao dano provocado, e para os 28 dias de idade, a argamassa de referência após dano registou uma massa volúmica semelhante (aumento de 1%) à da argamassa sem dano. Já as argamassas com substituição de cimento por fíler calcário, viram as massas volúmicas aparentes diminuídas em 1% para a argamassa FC15 e não obteve variação para argamassa FC30. Aos 120 dias de idade, verifica-se que as massas volúmicas são semelhantes entre os provetes danificados e não danificados, para cada tipo de argamassa, com variações inferiores a 1%.

Os dados permitem, também, constatar que, dos 28 dias para os 120 dias de idade, há um aumento da massa volúmica aparente em todas as argamassas, como seria expectável. Para as argamassas do tipo FC, o aumento foi ligeiro, tanto nas argamassas danificadas como não danificadas, cerca de 2%. Por outro lado, a argamassa REF apresentou um aumento ligeiro nos provetes não danificados (2%) e um valor semelhante para os provetes danificados (1%).

Analisando o efeito da substituição de cimento por cinza volante (Figura 62), com percentagens de substituição de 15% e 30%, verifica-se que a massa volúmica aparente, aos 28 dias de idade se viu aumentada em 4% e 2%, respetivamente. Assim, considera-se que a massa volúmica aparente da argamassa CV15 apresentou um aumento significativo e a argamassa CV30 registou um aumento ligeiro de massa volúmica aparente, quando comparadas com a argamassa REF, e de acordo com os critérios definidos na Tabela 23. Fazendo a mesma análise, agora, para os 120 dias de idade, pode-se concluir que, relativamente à argamassa REF, as argamassas CV15 e CV30 apresentaram um aumento ligeiro de massa volúmica aparente de cerca de 2%.

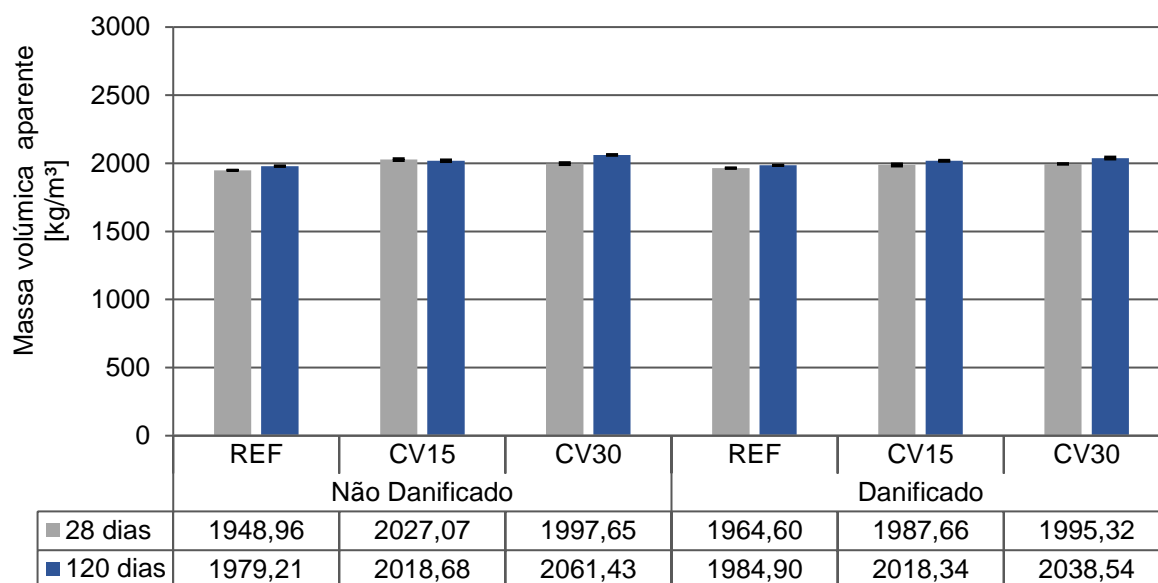


Figura 62 - Valores médios da massa volúmica aparente dos provetes com cinza volante, danificados e não danificados, aos 28 e aos 120 dias

Relativamente ao dano provocado, e para os 28 dias de idade, as argamassas com substituição de cimento por cinza volante viram as massas volúmicas aparentes diminuídas em 2% e 0,1% (CV15 e CV30, respetivamente). Aos 120 dias de idade, verifica-se que as massas volúmicas das argamassas CV15 são semelhantes entre os provetes danificados e não danificados, com variações inferiores a meio ponto percentual. No caso das argamassas CV30, verifica-se uma diminuição da massa volúmica aparente na ordem dos 1% quando comparado o provete com dano com o provete sem dano.

Os dados permitem, também, constatar que, dos 28 dias para os 120 dias de idade, há um aumento da massa volúmica aparente em todas as argamassas, com exceção da argamassa CV15 sem dano. Enquanto a argamassa REF registou um maior aumento nos provetes sem dano, na argamassa CV15 e CV30, o aumento de massa volúmica aparente foi mais expressivo na argamassa com dano.

Relativamente à massa volúmica específica, os valores obtidos nas diferentes argamassas encontram-se na Tabela 34 e representados nas Figura 63 e Figura 64.

Tabela 34 - Valores médios da massa volúmica específica dos provetes danificados e não danificados, aos 28 e aos 120 dias

Idade		28 dias			120 dias		
Argamassa	Provetes	M.V. Esp. [kg/m ³]	Desv. P. [kg/m ³]	C.V.	M.V. Esp. [kg/m ³]	Desv. P. [kg/m ³]	C.V.
REF	ND	2522,46	5,26	0,21	2427,73	9,76	0,40
	D	2539,47	8,66	0,34	2447,18	18,67	0,76
FC15	ND	2487,53	18,52	0,74	2401,22	17,22	0,72
	D	2436,27	5,03	0,21	2388,51	19,32	0,81
FC30	ND	2531,99	6,49	0,26	2420,72	21,17	0,88
	D	2483,42	30,08	1,21	2436,40	10,41	0,43
CV15	ND	2505,08	5,56	0,22	2491,23	11,21	0,45
	D	2537,98	18,67	0,74	2474,77	13,53	0,55
CV30	ND	2531,53	21,78	0,86	2416,73	15,35	0,64
	D	2529,37	29,50	1,17	2448,69	39,50	1,61
ND – Proвете não danificado; D – Proвете danificado							
M.V. Esp. – Massa volúmica específica							
Desv. P. – Desvio padrão; C.V. – Coeficiente de variação							

Analisando o efeito da substituição de cimento por fíler calcário (Figura 63), com percentagens de substituição de 15% e 30%, verifica-se que a massa volúmica específica, aos 28 dias de idade, sofreu uma diminuição de 1% para a argamassa FC15 e um aumento de 0,4% para a argamassa FC30. Assim, considera-se que as massas volúmicas específicas da argamassa REF, FC15 e FC30 são semelhantes, de acordo com os critérios definidos na Tabela 23. Fazendo a mesma análise, agora, para os 120 dias de idade, pode-se concluir o mesmo, atendendo que a argamassa FC15 registou uma diminuição de 1% e a argamassa FC30 registou um aumento de 0,3%.

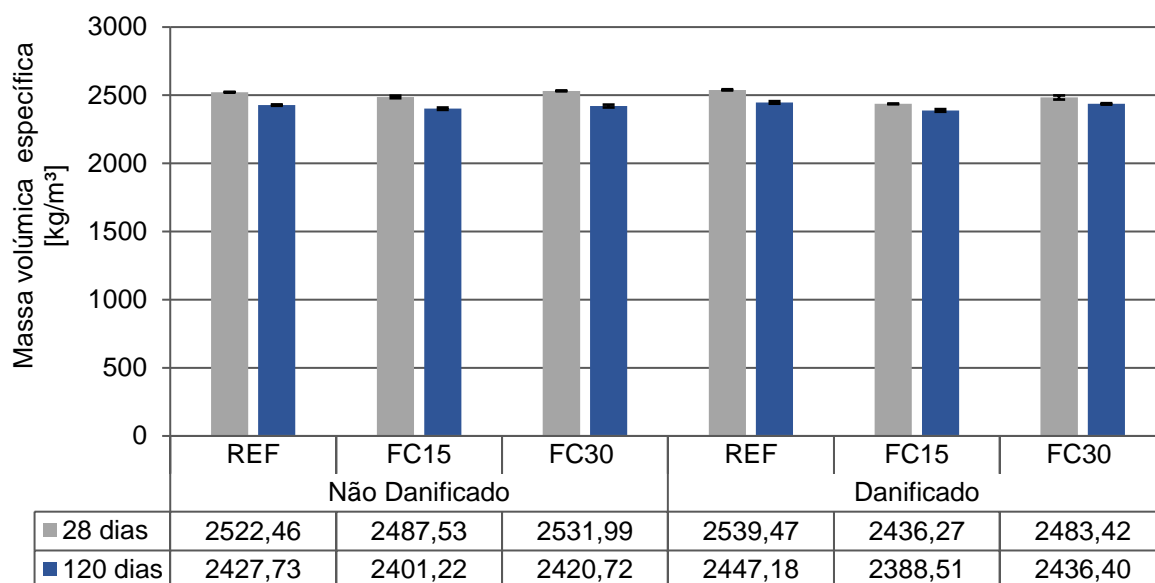


Figura 63 - Valores médios da massa volúmica específica dos provetes com fíler calcário, danificados e não danificados, aos 28 e aos 120 dias

Relativamente ao dano provocado, e para os 28 dias de idade, a argamassa de referência após dano registou uma massa volúmica específica semelhante (aumento de 1%) à da argamassa sem dano. Já as argamassas com substituição de cimento por fíler calcário, viram as massas volúmicas específicas diminuídas em 2%. Aos 120 dias de idade, verifica-se que as massas volúmicas específicas são semelhantes entre os provetes danificados e não danificados, para cada tipo de argamassa, com variações na ordem de 1%.

Os dados permitem, também, constatar que, dos 28 dias para os 120 dias de idade, há uma diminuição da massa volúmica específica em todas as argamassas. Esta diminuição tem maior expressão nas argamassas sem dano do tipo FC (3 a 4%) do que nas argamassas com dano (2%). Na argamassa REF, tanto para os provetes com dano como para os provetes sem dano, verificou-se uma diminuição significativa, na ordem dos 4%.

Analisando o efeito da substituição de cimento por cinza volante (Figura 64), com percentagens de substituição de 15% e 30%, verifica-se que a massa volúmica específica, aos 28 dias de idade se viu diminuída em 1% para a argamassa e menos de 1% para argamassa CV30. Assim, considera-se que as massas volúmicas específicas das argamassas CV15 e CV30 apresentaram valores de massa volúmica específica semelhantes aos obtidos na argamassa REF, de acordo com os critérios definidos na Tabela 23. Fazendo a mesma análise, agora, para os 120 dias de idade, pode-se concluir que, relativamente à argamassa REF, a argamassa CV15 apresenta um aumento ligeiro, na ordem dos 3%. Já a argamassa CV30 apresentou uma variação da massa volúmica específica muito baixa, inferior a 1%.

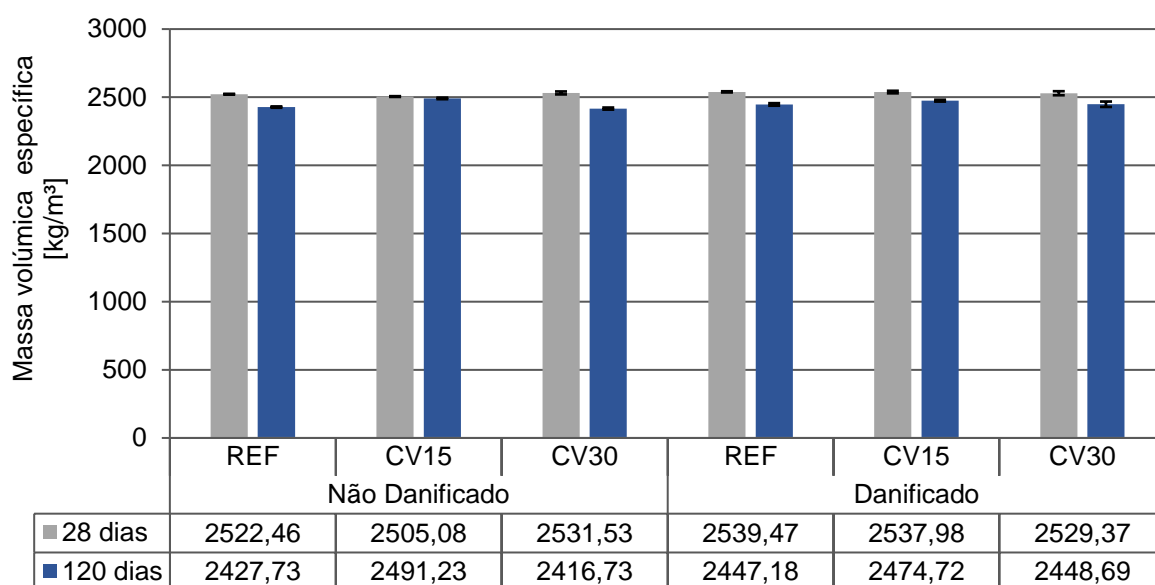


Figura 64 - Valores médios da massa volúmica específica dos provetes com cinza volante, danificados e não danificados, aos 28 e aos 120 dias

Relativamente ao dano provocado, tanto aos 28 como para os 120 dias de idade, todas as argamassas apresentaram valores semelhantes, entre provetes danificados e não danificados, com variações até 1%.

Os dados permitem, também, constatar que, dos 28 dias para os 120 dias de idade, há uma diminuição da massa volúmica específica em todas as argamassas. Esta diminuição tem maior expressão nas argamassas CV15 para os provetes com dano e nos provetes de argamassa CV30 sem dano. Ou seja, na argamassa CV15 obteve-se uma diminuição ligeira da massa volúmica específica nos provetes com dano e um valor nos provetes sem dano (2% e 1% respetivamente).

Quanto às argamassas de REF, em ambos os provetes, danificado e não danificado, observou-se uma diminuição significativa da massa volúmica específica, na ordem dos 4%. E o mesmo se verificou para os provetes não danificados da argamassa CV30, com uma diminuição significativa, na ordem dos 5%, conforme os critérios da Tabela 23.

5.3.6. ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

O ensaio de absorção de água por capilaridade, cujo procedimento se encontra descrito em 4.10.6, permitiu determinar quantidade de água, ao longo de um intervalo de tempo, que cada argamassa consegue absorver e reter bem como a maior ou menor velocidade com que se dá essa absorção e retenção.

Com esta informação é possível traçar as curvas de absorção de água por capilaridade, calcular o valor assintótico (V.A.), que traduz a quantidade máxima de água absorvida por capilaridade, e o coeficiente de capilaridade (C.C) das argamassas estudadas, que mostra a velocidade com que se dá a absorção de água nos instantes iniciais [101].

A análise dos resultados obtidos para o ensaio de absorção de água por capilaridade, será efetuada, em primeiro lugar através de uma verificação do desenvolvimento das curvas de absorção por capilaridade, e por último, uma análise do coeficiente de capilaridade (C.C.) e do valor assintótico (V.A.), respetivamente.

Desde a Figura 65 até à Figura 72, observam-se os gráficos com as curvas de absorção de água por capilaridade, inicialmente para o ensaio completo e por fim para os 30 minutos iniciais do ensaio, aos 28 e aos 120 dias, para cada tipo de argamassa em análise.

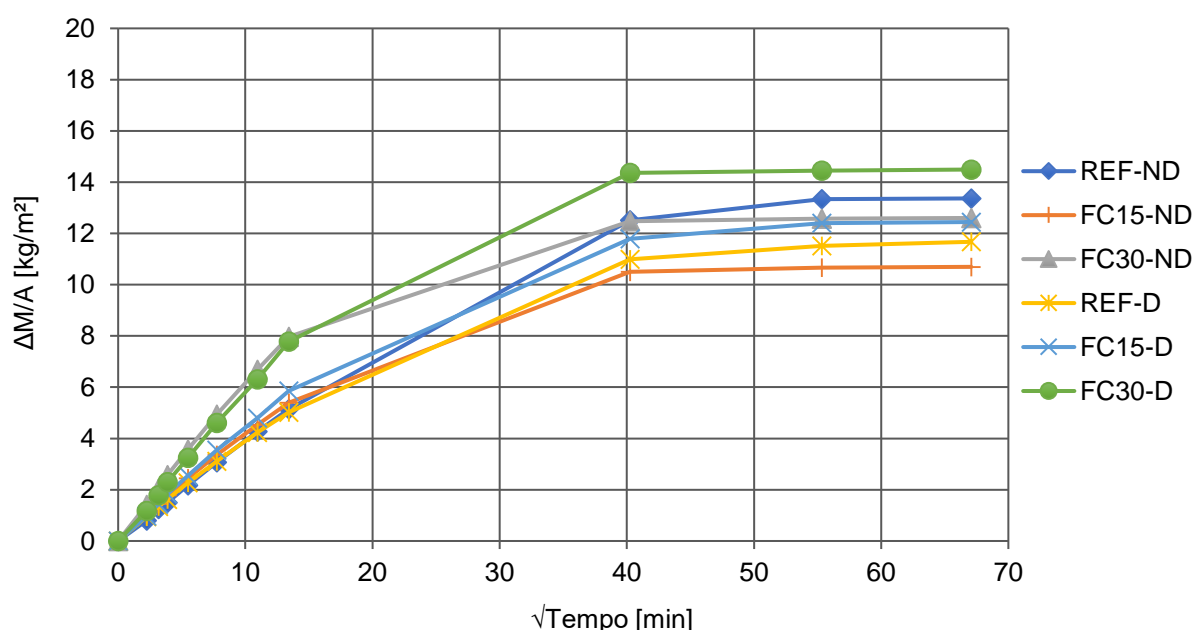


Figura 65 - Absorção de água por capilaridade, dos provetes com fíler calcário, aos 28 dias

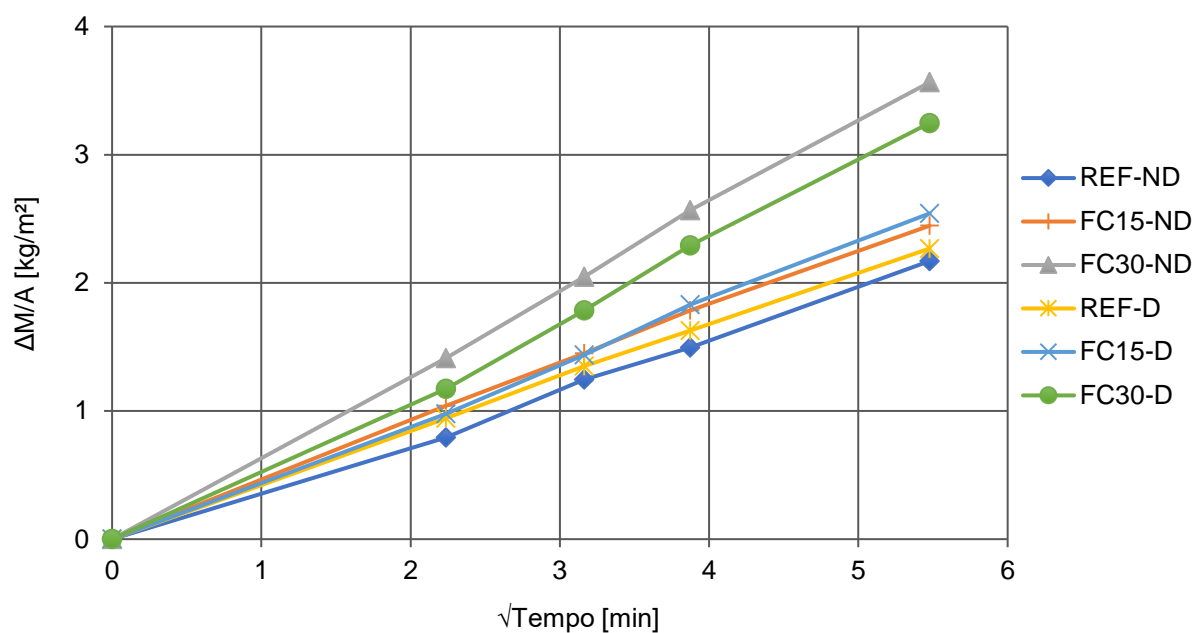


Figura 66 - Absorção de água por capilaridade, dos provetes com fíler calcário, aos 28 dias (30 minutos iniciais)

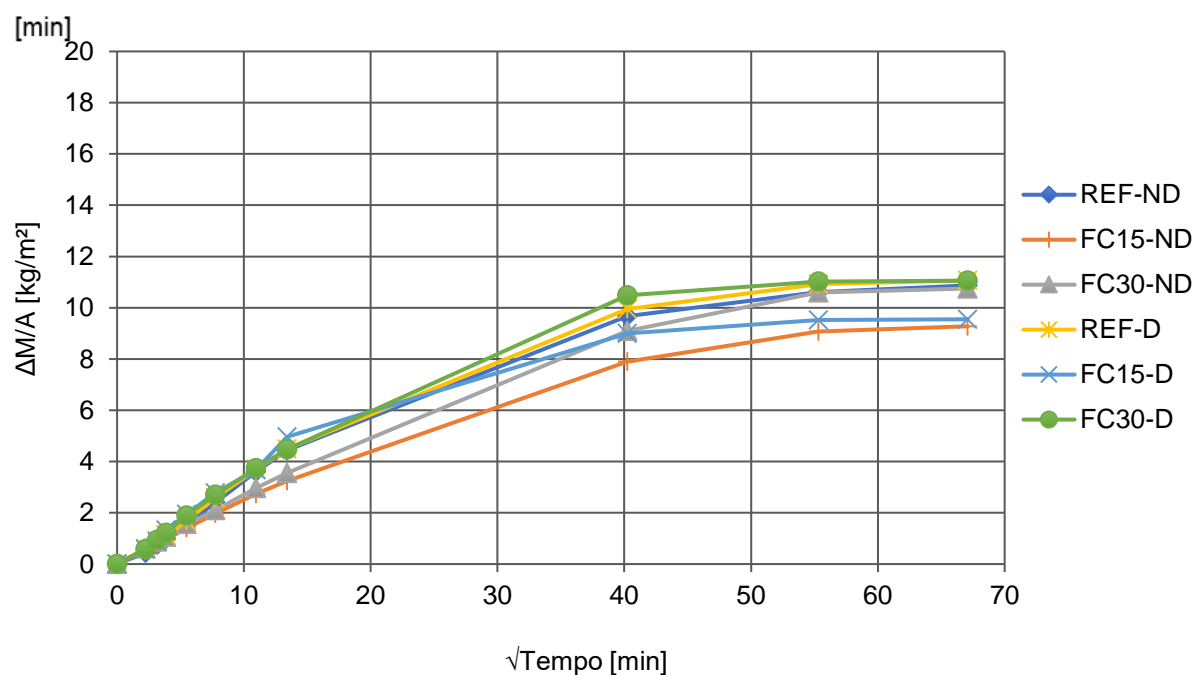


Figura 67 - Absorção de água por capilaridade, dos provetes com fíler calcário, aos 120 dias

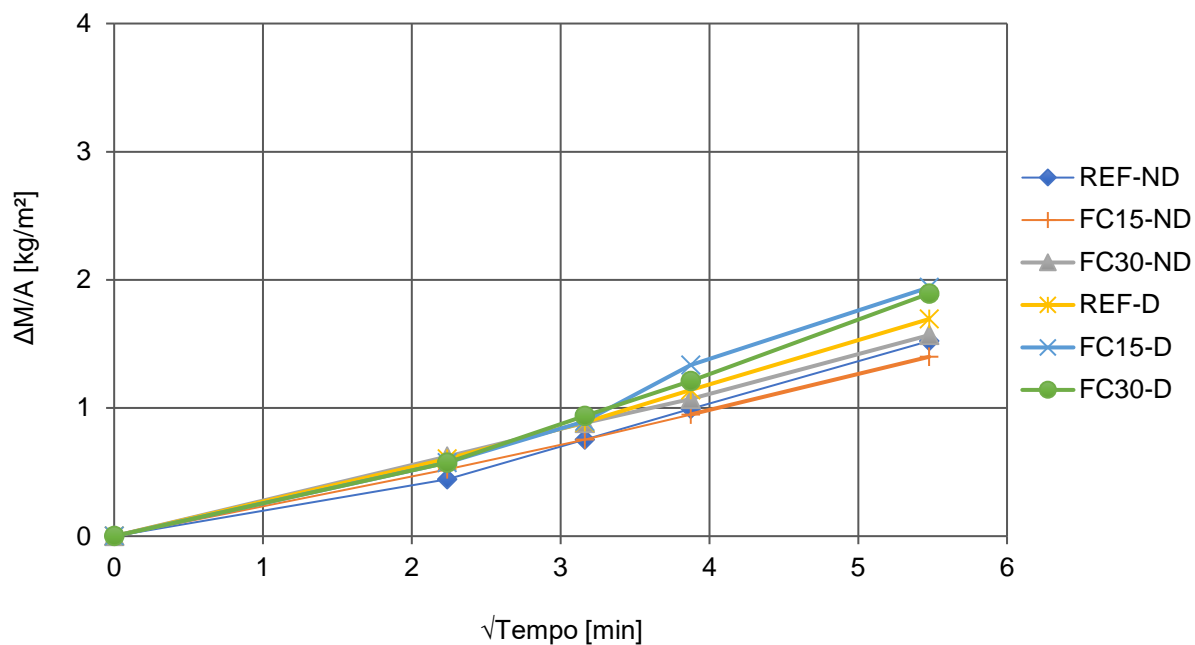


Figura 68 - Absorção de água por capilaridade, dos provetes com fíler calcário, aos 120 dias (30 minutos iniciais)

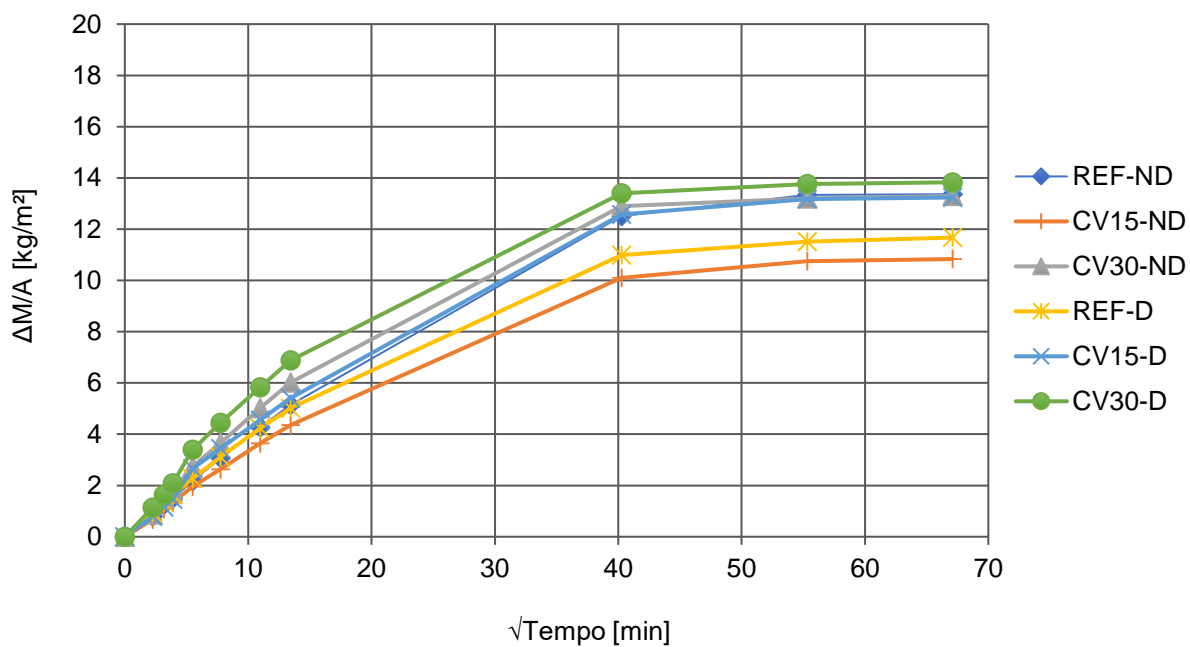


Figura 69 - Absorção de água por capilaridade, dos provetes com cinza volante, aos 28 dias

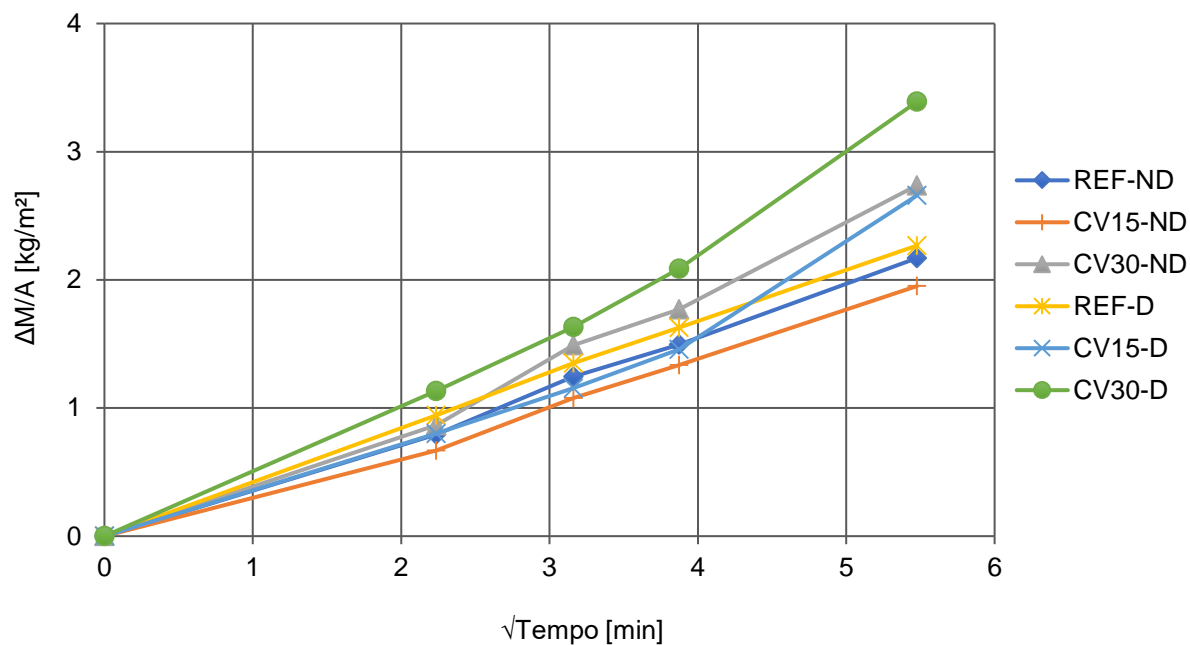


Figura 70 - Absorção de água por capilaridade, dos provetes com cinza volante, aos 28 dias (30 minutos iniciais)

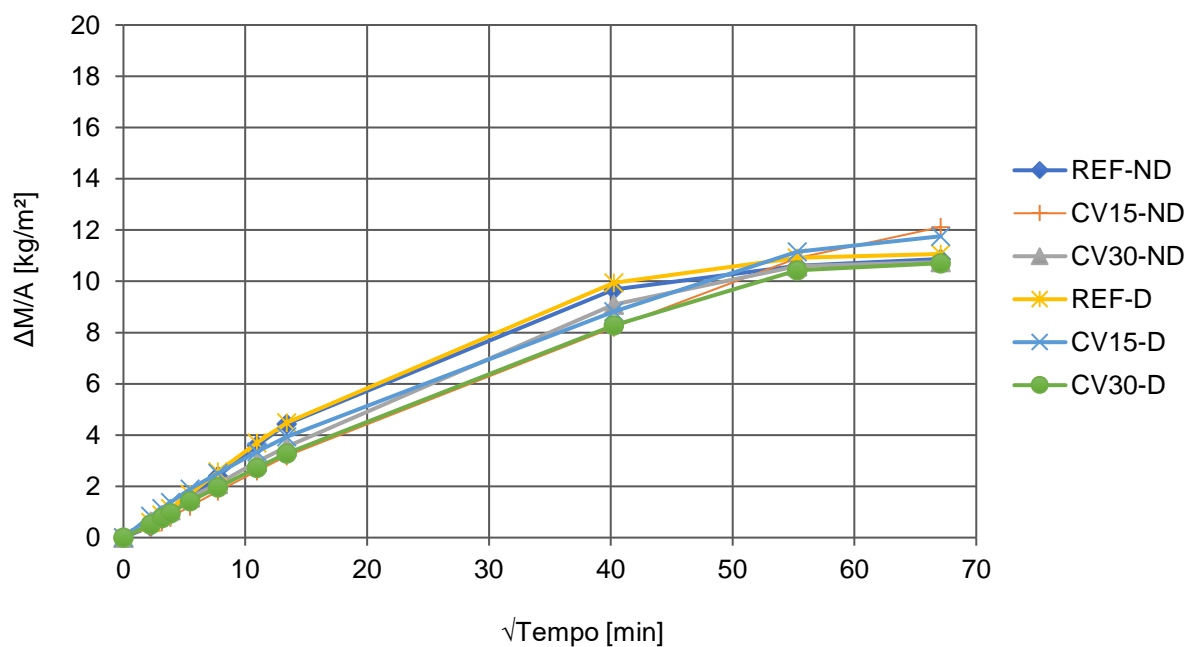


Figura 71 - Absorção de água por capilaridade, dos provetes com cinza volante, aos 120 dias

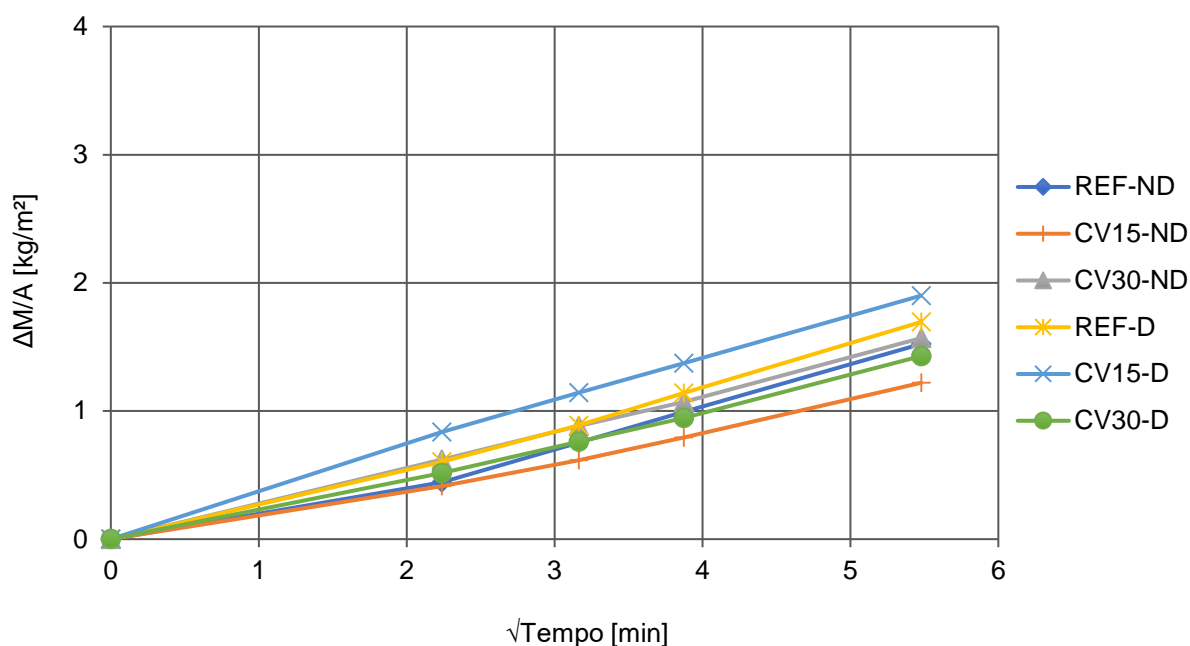


Figura 72 - Absorção de água por capilaridade, dos provetes com cinza volante, aos 120 dias (30 minutos iniciais)

A partir do declive inicial do troço das curvas de absorção, calcula-se o coeficiente de capilaridade (C.C.). Este declive inicial corresponde aos 30 minutos iniciais do ensaio e corresponde ao intervalo onde se dá uma maior absorção de água. Estes valores, bem como respetivo desvio padrão e coeficiente de variação, encontram-se apresentados na Tabela 35 e, devidamente esquematizados, nos gráficos das Figura 73 e Figura 74.

Tabela 35 - Coeficiente de capilaridade dos provetes danificados e não danificados, aos 28 e aos 120 dias

Idade		28 dias			120 dias		
Argamassa	Provetes	C.C. [kg/m ²]	Desv. P. [kg/m ²]	C.V.	C.C. [kg/m ²]	Desv. P. [kg/m ²]	C.V.
REF	ND	0,43	0,04	8,17	0,38	0,08	20,34
	D	0,41	0,06	13,47	0,34	0,06	17,89
FC15	ND	0,43	0,06	14,56	0,27	0,03	12,36
	D	0,48	0,10	21,32	0,42	0,18	43,06
FC30	ND	0,66	0,12	18,59	0,29	0,07	23,76
	D	0,64	0,09	13,30	0,41	0,05	12,00
CV15	ND	0,40	0,04	9,54	0,25	0,03	11,30
	D	0,57	0,03	5,45	0,33	0,12	37,19
CV30	ND	0,58	0,15	25,50	0,21	0,06	28,09
	D	0,70	0,31	43,96	0,28	0,07	23,50

ND – Proвете não danificado; D – Proвете danificado

C.C. – Coeficiente de capilaridade; Desv. P. – Desvio padrão; C.V. – Coeficiente de variação

Analisando o efeito da substituição de cimento por fíler calcário (Figura 73), com percentagens de substituição de 15% e 30%, verifica-se que o coeficiente de capilaridade (C.C.), aos 28 dias de idade, se viu aumentado em 2% e 56%, respetivamente. Assim, considera-se que o C.C. da argamassa REF e da FC15 são semelhantes e que argamassa FC30 sofreu um aumento significativo, de acordo com os critérios definidos na Tabela 24. Por outro lado, aos 120 dias de idade, verificou-se uma diminuição do C.C. nas argamassas do tipo FC face à argamassa REF. Ou seja, tanto a argamassa FC15 como a argamassa FC30 registaram diminuições significativas, 29% e 23% respetivamente, quando comparadas com a argamassa REF.

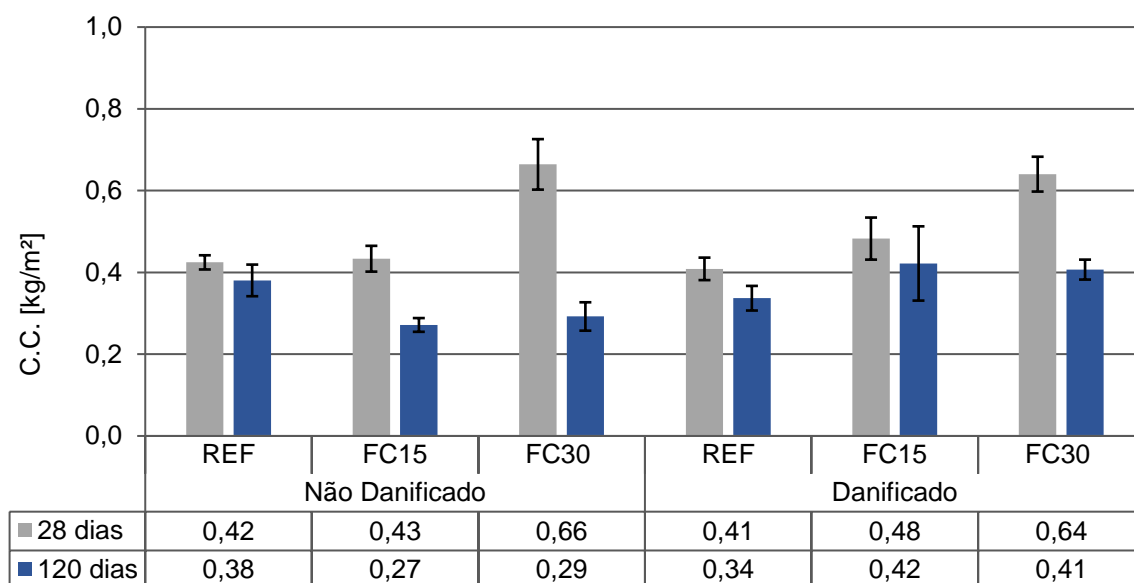


Figura 73 - Coeficiente de capilaridade dos provetes com fíler calcário, danificados e não danificados, aos 28 e aos 120 dias

Relativamente ao dano provocado, e para os 28 dias de idade, os provetes danificados da argamassa de referência e da argamassa FC30 registaram um C.C. semelhante (diminuição de 4%) em comparação aos provetes não danificados. Já os provetes danificados da argamassa FC15 obtiveram um aumento ligeiro (11%) do C.C., face aos provetes sem dano. Aos 120 dias de idade, verifica-se que os C.C. aumentaram em todas as argamassas identificadas no gráfico da Figura 73, com a exceção da argamassa REF que obteve uma diminuição ligeira (11%) face aos mesmos provetes sem dano. Nos provetes danificados, os C.C. sofreram um aumento acentuado na argamassa FC15 e um aumento significativo na argamassa FC30, 55% e 39% respetivamente. Os dados permitem, no entanto, constatar que, dos 28 dias para os 120 dias de idade, há uma diminuição do C.C. em todas as argamassas. Esta diminuição é mais expressiva na argamassa do tipo FC para provetes não danificados (37% a 56%), sendo que os provetes danificados apresentaram diminuições entre os 13% e 36%, para FC15 e FC30 respetivamente. A argamassa REF apresenta tendência contrária, obtendo uma diminuição do C.C. mais expressiva nos provetes danificados em comparação com os não danificados (10% e 18% respetivamente).

Analisando o efeito da substituição de cimento por cinza volante (Figura 74), com percentagens de substituição de 15% e 30%, verifica-se que o coeficiente de capilaridade (C.C.), aos 28 dias de idade, se viu diminuído em 7% e aumentado em 36%, respetivamente. Assim, considera-se que o C.C. da argamassa REF e da CV15 são semelhantes e que argamassa CV30 sofreu um aumento significativo de acordo com os critérios definidos na Tabela 24. Por outro lado, aos 120 dias de idade, deu-se uma diminuição do C.C. em ambas

as argamassas do tipo CV face à argamassa REF. Ou seja, tanto a argamassa CV15 como a argamassa CV30 registaram diminuições significativas, 35% e 46% respetivamente.

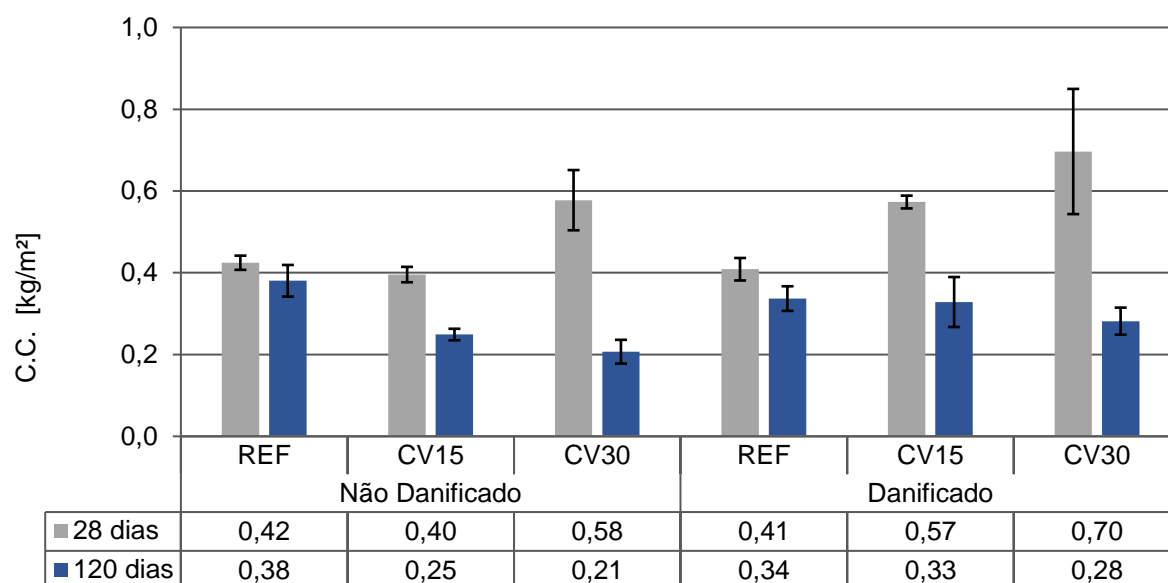


Figura 74 - Coeficiente de capilaridade dos provetes com cinza volante, danificados e não danificados, aos 28 e aos 120 dias

Relativamente ao dano provocado, o mesmo fenómeno foi verificado aos 28 e aos 120 dias, o C.C. diminuiu na argamassa REF e aumentou nas argamassas do tipo CV, face aos provetes sem dano. Aos 28 dias, a argamassa de REF obteve um valor semelhante e as argamassas CV15 e CV30 obtiveram um aumento significativo do C.C. face aos provetes sem dano (4%, 41% e 21% respetivamente). Aos 120 dias, a argamassa de REF obteve uma diminuição ligeira de C.C. e as argamassas CV15 e CV30 obtiveram um aumento significativo do C.C. face aos provetes sem dano (11%, 32% e 36% respetivamente).

Dos 28 dias para os 120 dias de idade, há uma diminuição do C.C. em todas as argamassas. As argamassas REF e CV15 apresentam diminuições mais expressivas para os provetes danificados face aos provetes não danificados, enquanto que na argamassa CV30 se observa o inverso.

O valor assintótico (V.A.) permite avaliar a quantidade máxima de água absorvida por capilaridade. O ensaio deu-se por terminado quando o aumento de massa entre pesagens consecutivas foi inferior a 1% ou quando se atingiu o topo do provete. Os valores médios obtidos, bem como respetivo desvio padrão e coeficiente de variação, encontram-se apresentados na Tabela 36 e, devidamente esquematizados, nos gráficos das Figura 75 a Figura 76.

Tabela 36 - Valor assintótico dos provetes danificados e não danificados, aos 28 e aos 120 dias

Idade		28 dias			120 dias		
Argamassa	Provetes	V.A. [kg/m ²]	Desv. P. [kg/m ²]	C.V.	V.A. [kg/m ²]	Desv. P. [kg/m ²]	C.V.
REF	ND	13,35	0,45	3,369	10,858	0,417	3,838
	D	11,51	0,60	5,186	11,067	0,629	5,683
FC15	ND	10,68	0,36	3,359	9,278	0,706	7,605
	D	12,43	0,62	5,023	9,550	0,414	4,330
FC30	ND	12,57	0,39	3,092	10,742	0,526	4,901
	D	14,45	0,81	5,621	11,034	0,553	5,010
CV15	ND	10,83	0,47	4,300	12,117	0,897	7,402
	D	13,24	0,90	6,825	11,758	0,257	2,186
CV30	ND	13,28	2,045	15,397	8,895	0,560	6,293
	D	13,81	0,365	2,643	10,706	1,587	14,827

ND – Provete não danificado; D – Provete danificado

V.A. – Valor assintótico; Desv. P. – Desvio padrão; C.V. – Coeficiente de variação

Analisando o efeito da substituição de cimento por fíler calcário (Figura 75), com percentagens de substituição de 15% e 30%, verifica-se que o valor assintótico (V.A.), aos 28 dias de idade, se viu diminuído em 20% e 6%, respetivamente. Assim, considera-se que o V.A. da argamassa REF e da FC30 são semelhantes e que argamassa FC15 sofreu uma ligeira diminuição, de acordo com os critérios definidos na Tabela 24. O mesmo comportamento registou-se aos 120 dias de idade, verificando-se uma diminuição do V.A. nas argamassas do tipo FC face à argamassa REF. Ou seja, a argamassa FC15 registou uma diminuição ligeira, mas a argamassa FC30 teve um impacto semelhante em comparação à argamassa de referência, 15% e 1% respetivamente.

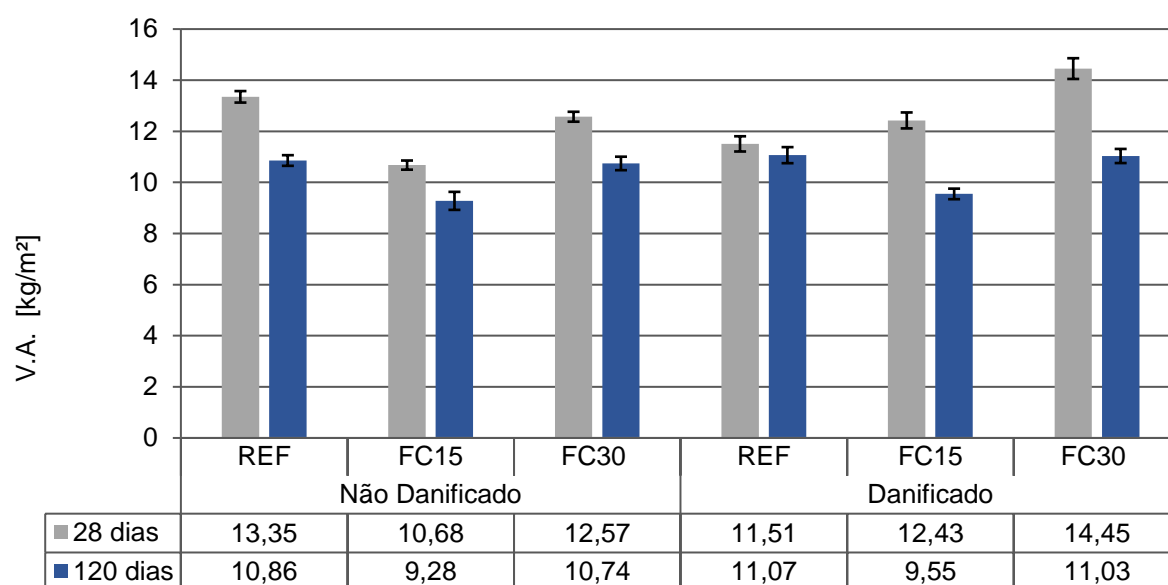


Figura 75 - Valor assintótico dos provetes com fíler calcário, danificados e não danificados, aos 28 e aos 120 dias

Relativamente ao dano provocado, e para os 28 dias de idade, os provetes danificados da argamassa de referência registaram uma ligeira diminuição do V.A. (14%) em comparação aos provetes não danificados. Já os provetes danificados das argamassas FC15 e FC30 obtiveram um aumento ligeiro (16% e 15%, respetivamente) do V.A., face aos provetes sem dano. Quanto aos 120 dias de idade, verifica-se que os V.A. aumentaram em todas as argamassas identificadas no gráfico da Figura 75, com aumentos na ordem dos 3%, face aos mesmos provetes sem dano. Recorrendo à Tabela 24, denota-se que o impacto em todas as argamassas foi semelhante, comparando os provetes danificados e não danificados.

Os dados permitem, no entanto, constatar que, dos 28 dias para os 120 dias de idade, há uma diminuição do V.A. em todas as argamassas. Esta diminuição é mais expressiva na argamassa do tipo FC para provetes danificados (23% a 24%), sendo que os provetes não danificados apresentaram diminuições entre os 13% e 15%, para FC15 e FC30 respetivamente. A argamassa REF apresenta uma tendência contrária, obtendo uma diminuição do V.A. mais expressiva nos provetes não danificados em comparação com os danificados (19% e 4% respetivamente).

Analisando o efeito da substituição de cimento por cinza volante (Figura 76), com percentagens de substituição de 15% e 30%, verifica-se que o valor assintótico (V.A.), aos 28 dias de idade, se viu diminuído em 19% e 1%, respetivamente. Assim, considera-se que o V.A. da argamassa REF e da CV30 são semelhantes e que argamassa CV15 sofreu uma ligeira diminuição de acordo com os critérios definidos na Tabela 24. Por outro lado, aos 120 dias de idade, deu-se um ligeiro aumento do V.A. na argamassa CV15 face à argamassa REF (12%) e uma ligeira diminuição de 18% na argamassa CV30.

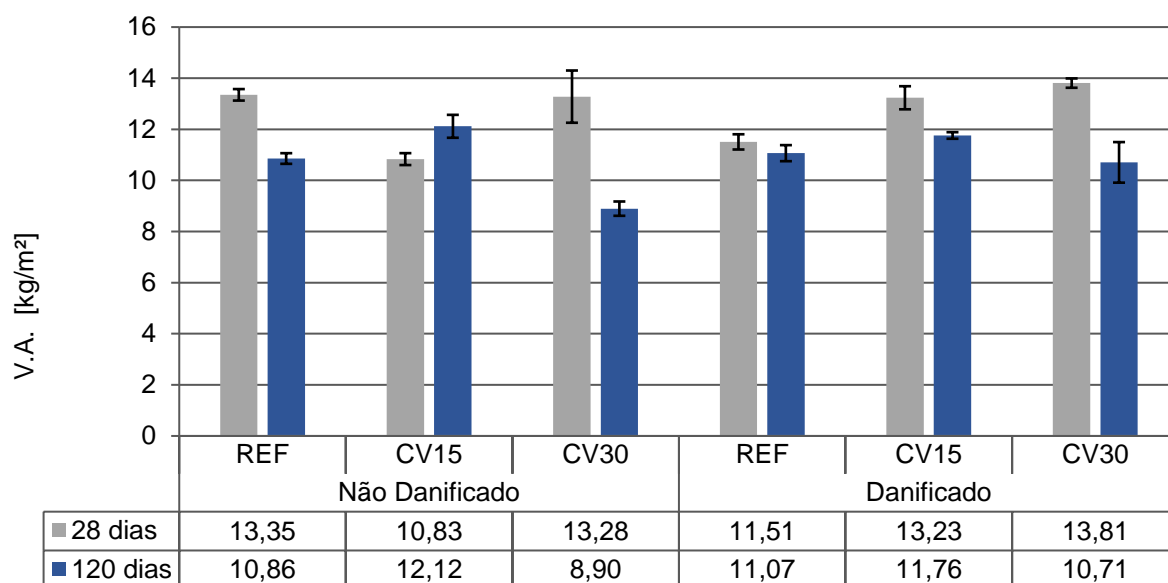


Figura 76 - Valor assintótico dos provetes com cinza volante, danificados e não danificados, aos 28 e aos 120 dias

Relativamente ao dano provocado, o mesmo fenómeno foi verificado aos 28 e aos 120 dias, o V.A. diminuiu na argamassa REF e aumentou nas argamassas do tipo CV, face aos provetes sem dano. Aos 28 dias, a argamassa de REF obteve uma ligeira diminuição, traduzida em uma diminuição de 14%, a argamassa CV15 registou um significativo aumento expresso pelo aumento de 22% face aos provetes não danificados e, por final, a argamassa CV30 obteve um impacto semelhante, devido ao aumento de 4%. Aos 120 dias, a argamassa CV15 obteve uma diminuição de 3% de V.A. e as argamassas de REF e CV30 obtiveram um aumento de 2% e de 20% respetivamente. Como tal, os provetes danificados das argamassas de REF e CV15 registaram um impacto semelhante, face aos provetes não danificados, e a argamassa CV30 obteve um ligeiro aumento.

Dos 28 dias para os 120 dias de idade, há uma diminuição do V.A. em todas as argamassas, com a exceção dos provetes não danificados da argamassa CV15, a qual registou um ligeiro aumento, na ordem dos 12%. As argamassas REF e CV30 apresentam diminuições mais expressivas para os provetes não danificados face aos provetes danificados.

5.3.7. ADERÊNCIA POR ARRANCAMENTO – ENSAIO DE ARRANCAMENTO POR TRAÇÃO “PULL-OFF” E OBSERVAÇÃO DE FISSURAÇÃO NOS TIJOLOS

A avaliação da aderência ao suporte, foi efetuada aos 28 e aos 120 dias para as diferentes argamassas e, a visualização de fissuração nos tijolos foi efetuada antes da realização dos entalhes nos mesmos, conforme descrito em 4.10.7.

Da inspeção visual efetuada, não foi possível observar, a “olho nu” a ocorrência de fissuração na superfície de qualquer uma das argamassas estudadas.

Relativamente ao ensaio de aderência por arrancamento (arrancamento por tração “pull-off”), este foi elaborado tendo em conta o procedimento descrito em 4.10.7 e tem como objetivo quantificar a carga necessária para provocar o arrancamento, por tração, de uma secção de argamassa sobre o suporte. Assim, a aderência ao suporte permite caracterizar um revestimento ao nível da sua durabilidade.

As roturas podem ser classificadas conforme o local onde as mesmas ocorrem, conforme se observa pela Figura 77.

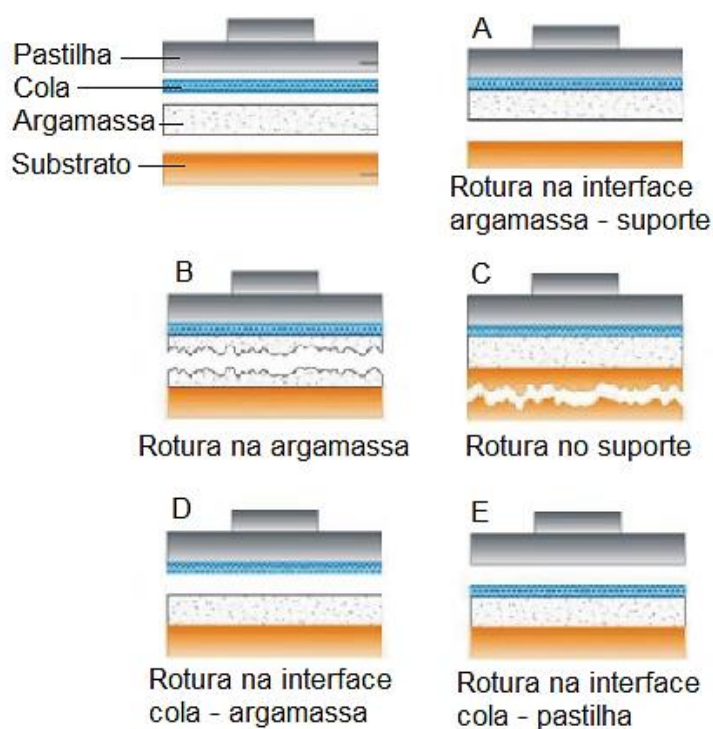


Figura 77 – Tipos de rotura a observar no ensaio de aderência por arrancamento – Adaptado de: [102]

Tanto o tipo de rotura como a respetiva tensão de aderência associada, encontram-se expostos na Tabela 37.

Tabela 37 – Tensão de aderência e tipo de rotura obtidos, aos 28 e aos 120 dias

Idade		28 dias		120 dias		
Argamassa	Nº Pastilha	Tipo de rotura	σ ader. [MPa]	Nº Pastilha	Tipo de rotura	σ ader. [MPa]
REF	1	A	0,28	16	A	0,16
	2	E	0,17	17	A	0,14
	3	A	0,20	18	A	0,21
FC15	4	B	0,10	19	C	0,48
	5	A	0,18	20	C	0,43
	6	A	0,19	21	C	0,45
FC30	7	B	0,14	22	A	0,12
	8	A	0,12	23	A	0,14
	9	(1)	-	24	A	0,17
CV15	10	A	0,25	25	A	0,16
	11	A	0,17	26	A	0,08
	12	A	0,16	27	A	0,38
CV30	13	A	0,14	28	A	0,28
	14	A	0,18	29	A	0,25
	15	A	0,16	30	A	0,14

σ ader. – Tensão de aderência [MPa]

(1) Ocorreu o destacamento da argamassa durante a execução dos entalhes na argamassa

Conforme se pôde observar os resultados não foram os esperados. Apesar de em algumas situações se ter dado rotura pela argamassa (rotura tipo B), também ocorreram algumas situações de rotura no suporte (rotura tipo C), rotura na interface cola-argamassa (rotura tipo D) e rotura na interface cola-pastilha (rotura tipo E). As situações anómalas acabaram por originar uma quantidade muito reduzida de valores representativos e por esta razão os resultados obtidos deste ensaio não puderam ser considerados. Na Figura 78 é possível observar alguns tipos de rotura que ocorreram durante o ensaio.

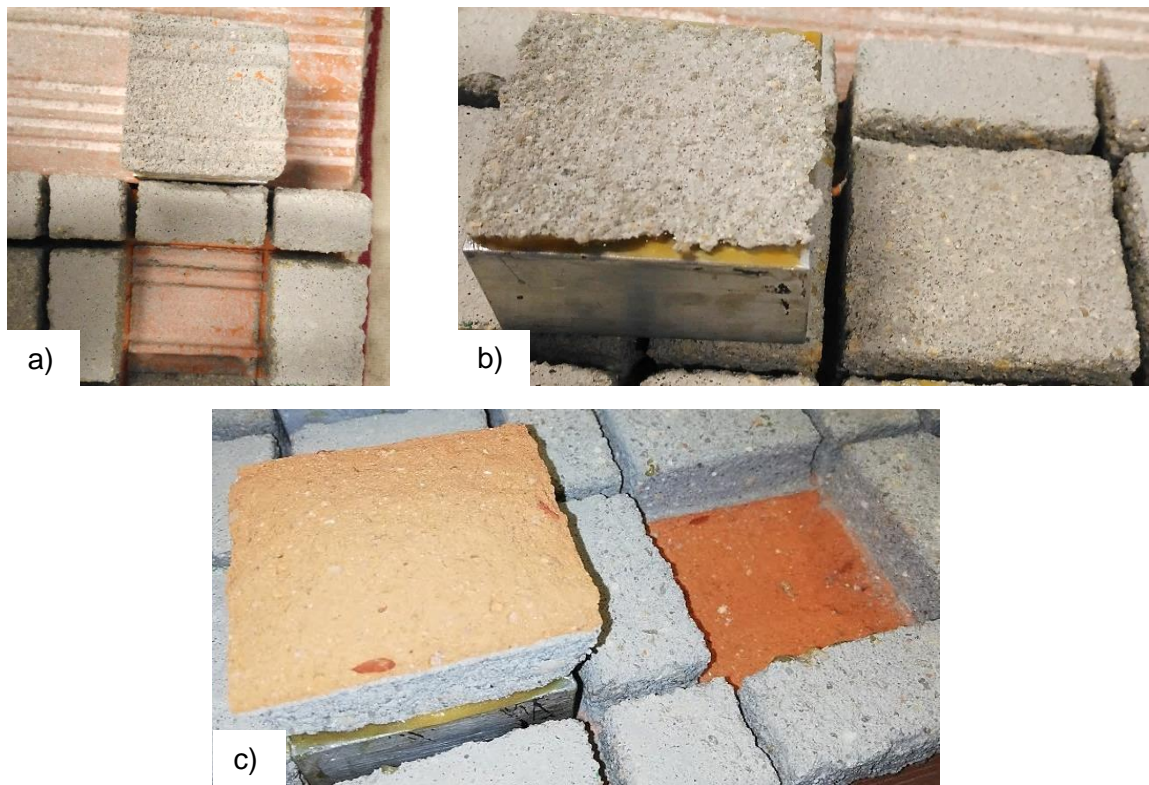


Figura 78 – Tipos de rotura observados no ensaio de aderência por arrancamento: a) Tipo A; b) Tipo B e c) Tipo C

6. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Conforme mencionado no capítulo 3.5, a autorregeneração pode ser avaliada recorrendo a dois tipos de ensaios: de recuperação das propriedades de durabilidade ou de recuperação das propriedades mecânicas.

Os primeiros incidem no ensaio da permeabilidade, que permite avaliar a facilidade com que o fluxo de água atravessa as fissuras, e, também, no ensaio de absorção de água que permite avaliar a facilidade com que uma argamassa absorve e retém água por absorção capilar.

Os segundos, recorrem a ensaios de medição da velocidade de ultrassons, resistência à compressão e resistência à tração por flexão.

No presente capítulo é feita uma análise cruzada dos resultados obtidos entre os diversos ensaios elaborados de modo a avaliar os benefícios das adições usadas e, possivelmente, um efeito de autorregeneração, quer pela substituição parcial do cimento por uma adição com propriedades pozolânicas - cinza volante – quer pela substituição parcial do cimento por fíler calcário – adição inerte.

No presente caso, os provetes, conforme explicado no capítulo 4.8, foram sujeitos a dano aplicando uma carga à compressão correspondente a, aproximadamente, 60% da tensão de rotura.

No entanto, ao analisar os resultados obtidos nos ensaios de caracterização física e mecânica subsiste a dúvida da efetividade do dano provocado. Se por um lado os resultados obtidos nos ensaios à compressão e à tração por flexão indicam que o dano causado não afetou a resistência mecânica dos provetes, causando até pequeno aumento da resistência nos provetes danificados, por outro lado alguns ensaios indiciam o contrário, nomeadamente o ensaio da porosidade aberta, massas volúmicas, coeficiente de capilaridade e velocidade dos ultrassons, que revelam diferenças apreciáveis nos resultados obtidos nos provetes danificados e não danificados. Por outro lado, a idade até à qual foi possível avaliar a progressão das características das argamassas (120 dias) foi curta, o que pode condicionar alguns resultados.

6.1. INFLUÊNCIA DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE CIMENTO POR FÍLER CALCÁRIO

A substituição parcial do cimento por fíler calcário teve como objetivo obter uma argamassa com menor energia incorporada. Reduzindo o teor em cimento e substituindo-o por correspondente massa de fíler calcário e é expectável que, pelo menos a curto prazo, as propriedades mecânicas decresçam, face à argamassa de referência. No entanto, pretendia-se avaliar se teria algum contributo para ativar a autorregeneração da argamassa.

Conforme já referido, o fíler calcário é constituído por carbonato de cálcio (CaCO_3) finamente moído. Ainda que o carbonato de cálcio não possua propriedades hidráulicas, não participando de forma ativa nas reações químicas que levam ao endurecimento da pasta de cimento e seja considerado quimicamente inerte, verifica-se que reage com o aluminato tricálcico (C_3A) e com o ferroaluminato tetracálcico (C_4AF), resultantes da hidratação do cimento, dando um pequeno contributo para o processo de endurecimento do cimento [72]. Para além disso, o fíler calcário contribui para o processo de hidratação do cimento, facilitando a formação da estrutura cristalina da pasta de cimento endurecida [17].

Relembra-se que as argamassas com substituição parcial de cimento por fíler calcário apresentam razão A/L superior à argamassa REF de forma a garantir condições semelhantes de consistência.

Analisando a Figura 79, relembra-se as razões A/L utilizadas e apresenta-se os valores do teor de ar, contabilizados nas argamassas, no estado fresco. É a argamassa do tipo FC15 a que apresenta teor de ar mais baixo.

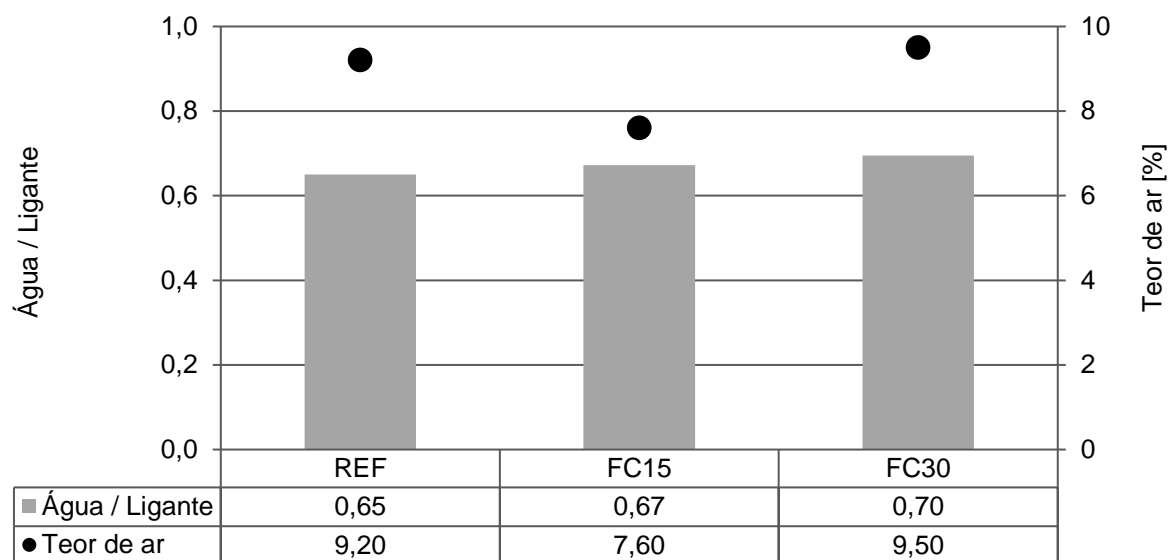


Figura 79 - Comparação entre a relação água/ligante e o teor de ar, aos 28 dias e aos 120 dias de idade, entre a argamassa REF, FC15 e FC30

Conforme mencionado anteriormente, nem todos os ensaios indicaram, de um modo claro, que a carga à compressão aplicada nos provetes tenha sido suficiente para danificar os mesmos. Os ensaios que permitem avaliar a autorregeneração através da recuperação das propriedades mecânicas parecem não ser conclusivos. Já os ensaios que permitem avaliar a autorregeneração através da recuperação das propriedades relacionadas com a durabilidade, nomeadamente a absorção de água por capilaridade, indiciam algum efeito de recuperação.

Da análise da Figura 80, observa-se que todas as argamassas obtiveram um aumento, dos 28 para os 120 dias, da massa volúmica aparente e uma diminuição da porosidade aberta, conforme esperado.

É a argamassa FC15 que regista o maior aumento de massa volúmica aparente, quer aos 28 dias, quer aos 120 dias, mas esse aumento não excede os 2% quando comparada com a argamassa REF. No entanto, aos 120 dias, a argamassa FC15 é a que apresenta uma maior diminuição da porosidade aberta em relação à argamassa REF, cerca de 15%.

Analisando também os provetes com dano, é também a argamassa do tipo FC15 que regista maior diminuição da porosidade aberta, no período dos 28 aos 120 dias, correspondente a 22% nos provetes não danificados e a 16% nos provetes danificados. Tais alterações não são alheias ao facto de ter sido a argamassa FC15 a registar menor teor de ar, no estado fresco.

Ainda conforme o gráfico da Figura 80, as tendências de variação da massa volúmica aparente e da porosidade aberta parecem manter-se nos provetes sem e com dano, não se podendo concluir que, com o dano infligido nas argamassas, haja um desenvolvimento destas

propriedades no período em análise mais significativo nas argamassas com substituição parcial de cimento por fíler calcário.

Assim, parece que a substituição de cimento por fíler calcário (30%) influi positivamente num melhor arranjo da estrutura interna após dano, face à argamassa de referência.

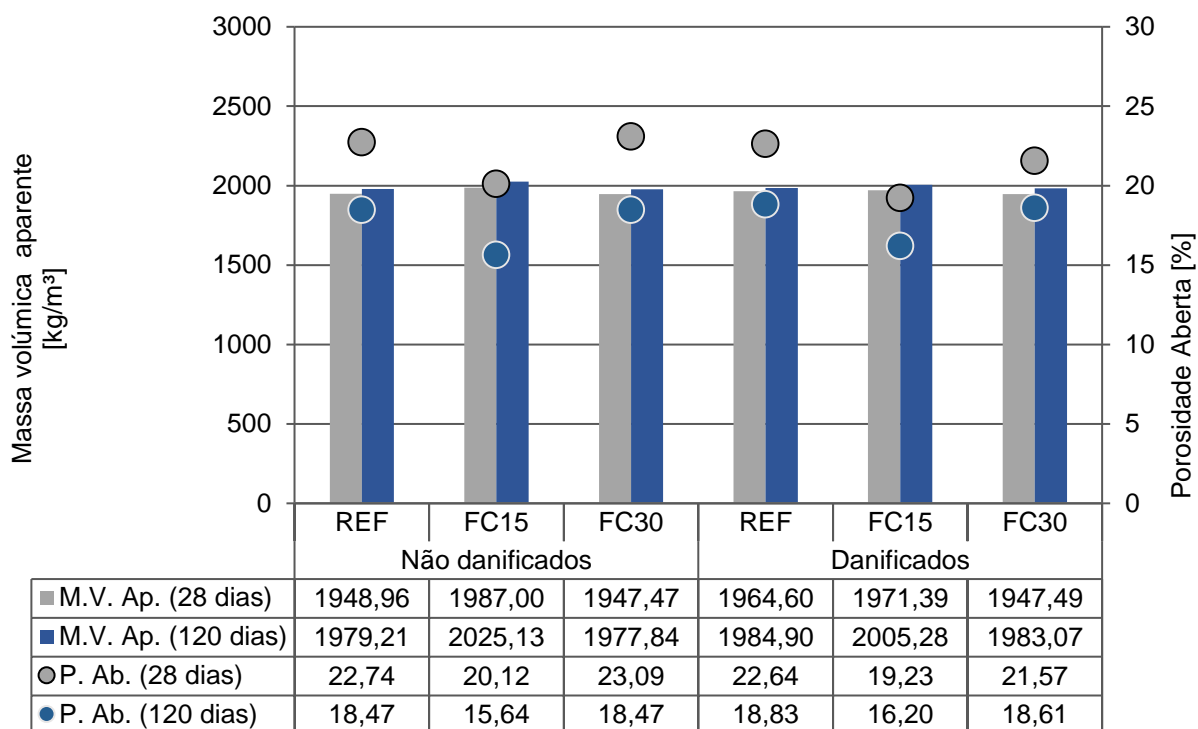


Figura 80 – Comparação da massa volumica aparente com a porosidade aberta, aos 28 dias e aos 120 dias de idade, entre a argamassa REF, FC15 e FC30

No gráfico da Figura 81, observa-se que a porosidade aberta manteve valores semelhantes, aos 28 dias, entre os provetes danificados e os provetes não danificados. Ao mesmo tempo, aos 28 dias, não foi possível observar uma diminuição das resistências mecânicas nos provetes danificados, conforme seria expectável. Assim, conclui-se que o dano infligido poderá não ter sido efetivo.

No entanto, apesar de aos 28 dias não se ter observado uma diminuição das resistências mecânicas nos provetes danificados, aos 120 dias observou-se que os provetes danificados não apresentaram um desenvolvimento de resistências mecânicas de forma tão acentuada quanto os provetes não danificados. Ou seja, dos 28 para os 120 dias, os provetes não danificados registaram um maior desenvolvimento das resistências (à compressão e à tração por flexão) bem como a diminuição da porosidade aberta, face aos provetes danificados. Assim, e mais uma vez, o efeito de uma eventual autorregeneração não é visível para as idades em estudo.

Por último, observou-se na Figura 81 que a diminuição da porosidade acompanhou o aumento das resistências mecânicas, tanto à tração por flexão como à compressão, como é suposto. Ainda assim, as tendências de variação das resistências mecânicas, e da porosidade aberta, parecem manter-se nos provetes sem e com dano, não se podendo concluir que, com o dano infligido nas argamassas, haja um desenvolvimento destas propriedades no período em análise mais significativo, nas argamassas com substituição parcial de cimento por fíler calcário.

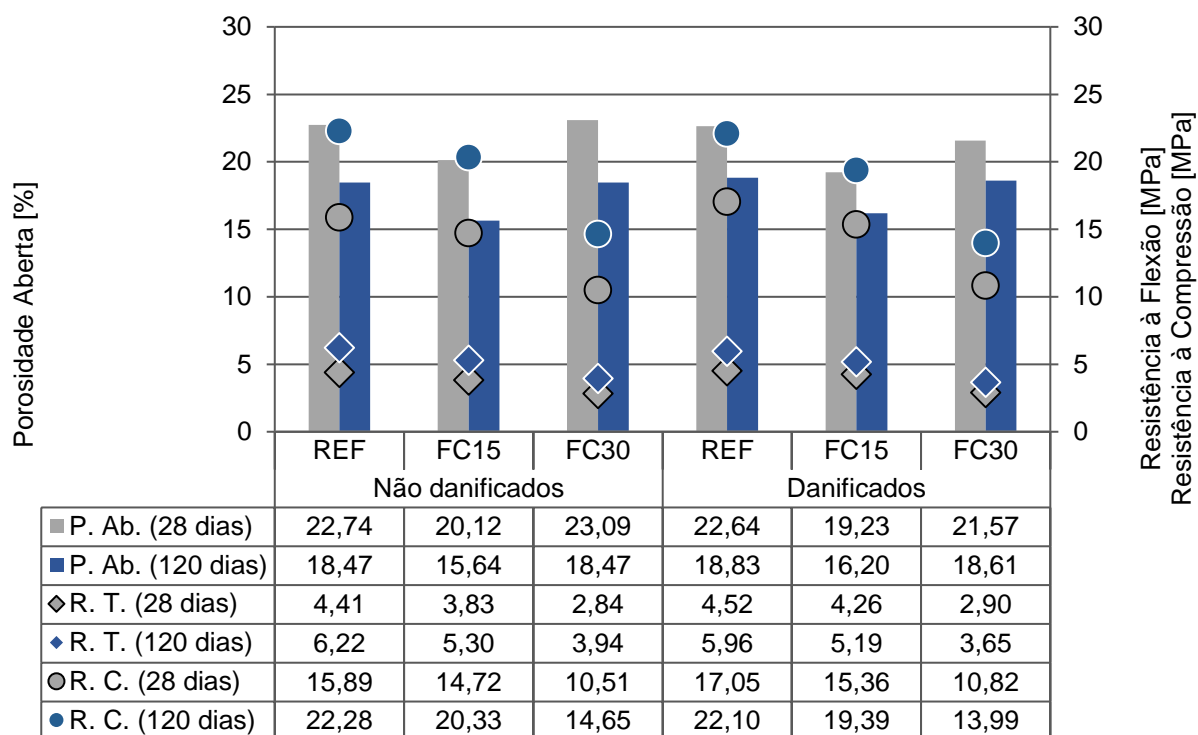


Figura 81 - Comparação da porosidade aberta com a resistência à tração por flexão e à compressão, aos 28 dias e aos 120 dias de idade, entre a argamassa REF, FC15 e FC30

Analisando ambas as Figura 80 e Figura 81, constatou-se que a massa volúmica acompanha a mesma tendência que as resistências, ou seja, aos 28 dias os provetes danificados apresentaram valores superiores, para ambos os parâmetros, relativamente aos provetes sem dano.

Uma argamassa com uma boa resistência mecânica deve estar, também, associada a um módulo de elasticidade mais baixo, por forma a permitir alguma deformabilidade e evitar o surgimento de fissuras no revestimento. Argamassas com maior deformabilidade são melhores para aplicação em revestimentos uma vez que permitem otimizar as resistências às tensões de tração sem transmitir esforços muito elevados aos suportes [103].

Com base na Figura 82, verificou-se que o aumento do módulo de elasticidade dinâmico acompanhou o aumento das resistências mecânicas (à compressão e à tração por flexão)

conforme expectável. A substituição do cimento por fíler calcário, mostrou provocar uma diminuição das resistências, que é agravada com o aumento da percentagem de substituição parcial de cimento por fíler calcário.

Assim, a resistência dos provetes à compressão e à tração por flexão diminui com a diminuição do teor de cimento na argamassa.

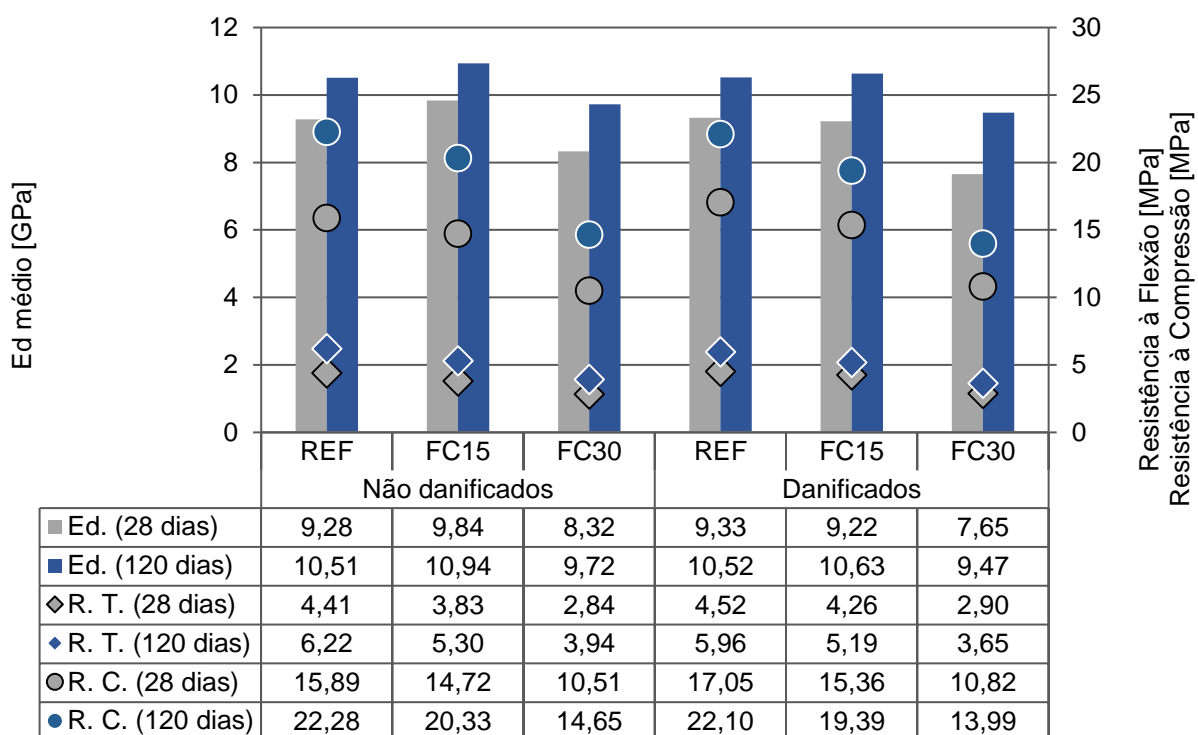


Figura 82 - Comparação do módulo de elasticidade dinâmico com a resistência à tração por flexão e à compressão, aos 28 dias e aos 120 dias de idade, entre a argamassa REF, FC15 e FC30

Mais uma vez, as tendências de variação das resistências mecânicas e do módulo de elasticidade parecem manter-se nos provetes sem e com dano, não se podendo concluir que, com o dano infligido nas argamassas, haja um desenvolvimento destas propriedades no período em análise mais significativo nas argamassas com substituição parcial de cimento por fíler calcário.

A absorção de água por capilaridade está associada à estrutura capilar e porosa da argamassa. Na Figura 83, é feita uma correlação entre a velocidade da absorção capilar (coeficiente de capilaridade) e da absorção total de água por capilaridade (valor assintótico) de cada argamassa em estudo.

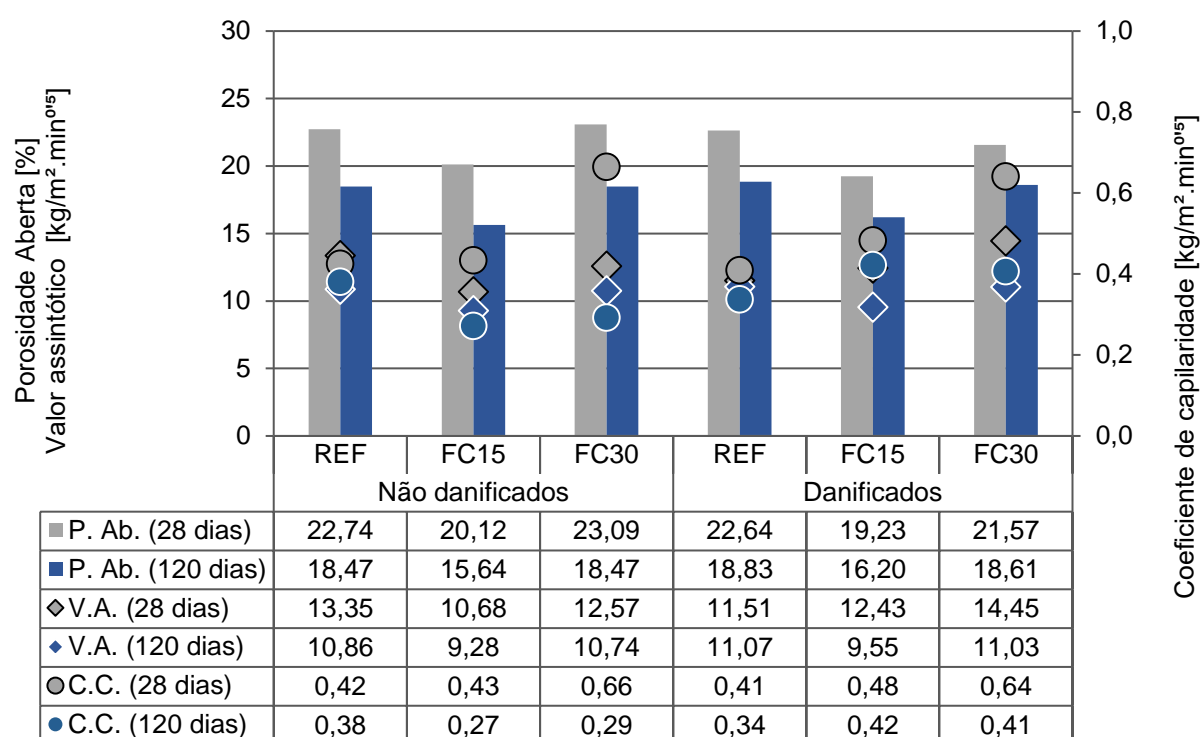


Figura 83 – Comparação entre a porosidade aberta, valor assintótico e coeficiente de capilaridade, aos 28 dias e aos 120 dias de idade, entre a argamassa REF, FC15 e FC30

A Figura 83 permite verificar que a substituição parcial de 15% cimento por fíler calcário conduz a argamassas com porosidade aberta mais baixa, acompanhadas por uma capacidade de absorção de água (V. A.), também, mais baixa. As argamassas FC30 parecem não registar ganhos significativos com a substituição parcial de cimento por fíler calcário, nestes parâmetros. No que diz respeito ao C.C., também é a argamassa FC15 a que apresenta, aos 120 dias, valores mais baixos.

Analisando os provetes com dano, verifica-se, também, que é a argamassa FC15 a que apresenta menores valores de porosidade aberta e de V.A. No que diz respeito ao C.C., nos provetes com dano, não se registou um ganho tão significativo dos 28 dias para os 120 dias de idade quanto o ocorrido nas argamassas sem dano. De alguma forma, ainda que o volume de vazios acessíveis tenha diminuído consideravelmente, a rede capilar registou melhorias menos significativas.

Conforme mencionado em 3.5, a velocidade de propagação dos ultrassons obtém valores superiores em materiais cimentícios, inferiores na água e obtém valores ainda mais baixos no ar. Ao mesmo tempo existem estudos [79] que comprovam a diminuição da velocidade de propagação dos ultrassons com o aumento da porosidade numa argamassa. Assim, é possível assumir que na presença de fissuração, no interior do provete, é suposto haver uma diminuição da velocidade de propagação dos ultrassons. Ao longo do tempo, é esperado que

a velocidade de propagação dos ultrassons aumente à medida que a fissura vai selando, passando a atravessar a mesma.

Apesar de em alguns ensaios não se poder confirmar a existência de dano efetivo, os dados obtidos na monitorização da velocidade de propagação dos ultrassons indicam o oposto.

Relembra-se que a medição, a cada 15 dias, da velocidade de propagação de ultrassons teve como objetivo tentar avaliar o desenvolvimento da estrutura interna das argamassas.

Relativamente ao dano, observa-se na Figura 84, que os provetes danificados da argamassa FC30 (FC30-D) obtiveram os valores mais baixos para a velocidade de propagação dos ultrassons, nas primeiras medições. No entanto, logo a seguir, o segundo valor mais baixo ocorreu na argamassa FC30-ND. É possível reparar que dentro de cada grupo de argamassas REF, FC15, FC30, o provete danificado obtém, de um modo geral, os valores mais baixos de velocidade de propagação dos ultrassons, o que vai de acordo com o pressuposto de que estes valores diminuem na presença de fissura. Apesar das diferenças óbvias, entre provetes com e sem dano, nas primeiras medições (M1 e M2), na última medição (M6) observa-se que as velocidades de propagação dos ultrassons foram aumentando gradualmente até registarem diferenças mínimas entre os provetes não danificados e os provetes danificados dentro do mesmo grupo. Tender-se-ia a pensar numa eventual autorregeneração caso os resultados dos restantes ensaios de caracterização apontassem no mesmo sentido.

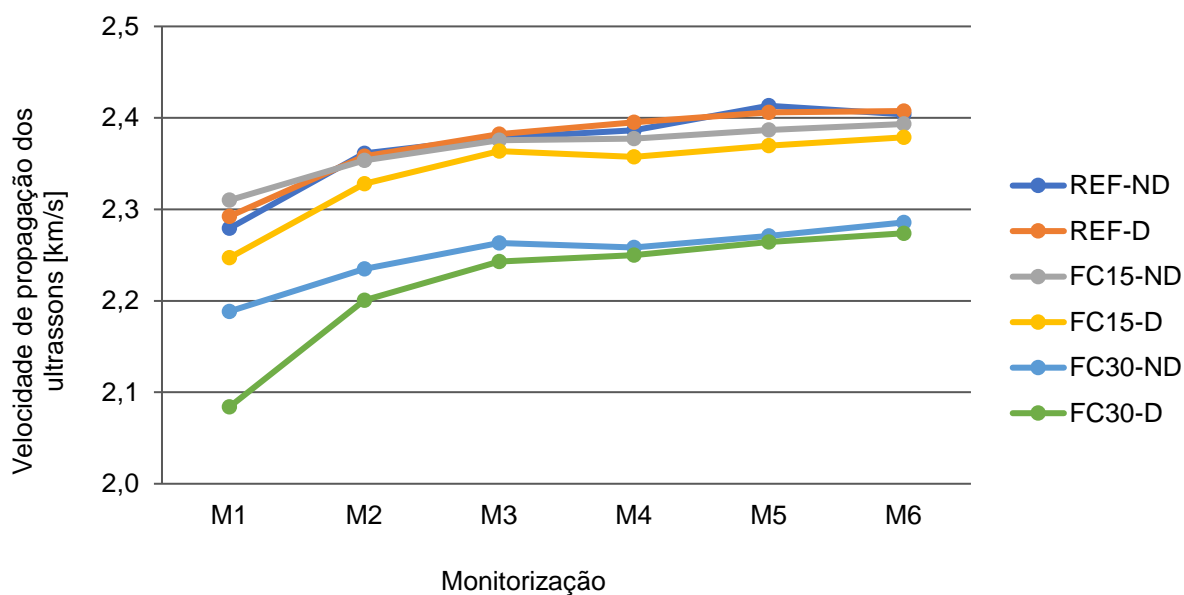


Figura 84 – Análise da monitorização da velocidade de propagação dos ultrassons nas argamassas REF, FC15 e FC30

Por outro lado, é possível observar que a substituição parcial de cimento por fíler de calcário gera valores mais baixos de velocidade de propagação dos ultrassons nas primeiras monitorizações, sendo este efeito mais agravado com o aumento desta substituição. O valor

mais baixo, foi observado nos provetes danificados da argamassa FC30 (FC30-D). Na última medição (M6), apesar de ocorrer um aumento gradual da velocidade de propagação dos ultrassons, as argamassas do tipo FC30 continuam a ter os valores mais baixos.

6.2. INFLUÊNCIA DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE CIMENTO POR CINZA VOLANTE

A substituição parcial do cimento por cinza volante teve como objetivo obter uma argamassa com menor energia incorporada, pela substituição parcial do ligante por um resíduo. Interessava avaliar em que medida podia contribuir para a obtenção de propriedades melhoradas face à argamassa de referência e que conseguisse recuperar o desempenho após ocorrência de dano.

Tal como se verificou no subcapítulo anterior, aos 28 dias, não foi possível observar uma diminuição das resistências mecânicas nos provetes danificados face aos provetes não danificados, conforme seria esperado. No entanto, observa-se que a substituição parcial do cimento por cinza volante resultou em melhores resultados nas resistências à compressão e à tração por flexão, comparativamente à argamassa com substituição parcial do cimento por fíler calcário.

Relembra-se, mais uma vez, que as argamassas com substituição parcial de cimento por cinza volante apresentam, à semelhança das argamassas com substituição de cimento por fíler calcário, razão A/L superior à argamassa REF de forma a garantir condições semelhantes de consistência.

Analisando o gráfico da Figura 85, relembra-se as razões A/L utilizadas e apresenta-se os valores do teor de ar, contabilizados nas argamassas, no estado fresco. É a argamassa do tipo CV30 a que apresenta teor de ar mais baixo. Verifica-se que com o aumento da percentagem de substituição de cimento por cinza volante, e consequente aumento da razão A/L para garantia da manutenção da consistência, o teor de ar da argamassa se vê diminuído.

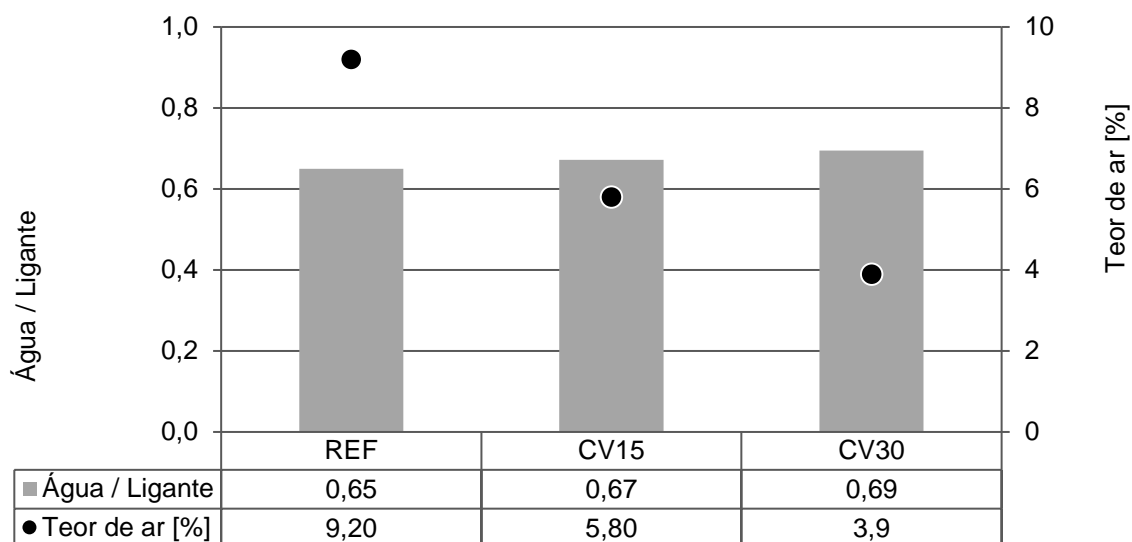


Figura 85 - Comparação entre a relação água/ligante e o teor de ar, aos 28 dias e aos 120 dias de idade, entre a argamassa REF, CV15 e CV30

Na Figura 86, observa-se que a substituição parcial do cimento por cinza volante tem como consequência o aumento da massa volúmica aparente, quer aos 28 dias quer aos 120 dias de idade. Consequentemente, a porosidade aberta vê-se diminuída, como esperado.

Mais uma vez, conclui-se que o dano infligido poderá não ter sido efetivo, uma vez que os provetes sujeitos ao dano não apresentaram diferenças significativas na massa volúmica aparente e na porosidade aberta, quando comparados com os provetes homólogos, sem dano.

Com exceção feita para a argamassa CV15, a tendência de variação da massa volúmica aparente e da porosidade aberta verifica-se nos provetes sem dano e com dano. É a argamassa CV30 a que apresenta valores de porosidade aberta mais baixos e foram os provetes sem dano que registaram a maior diminuição deste parâmetro (29%), dos 28 dias para os 120 dias de idade. De entre todos os provetes, e dos 28 dias para os 120 dias de idade, foi a argamassa CV30 a que apresentou o maior acréscimo percentual de massa volúmica aparente e o maior decréscimo percentual de porosidade aberta. Ainda assim, a argamassa CV30 com dano não conseguiu, e no período em análise, atingir o desempenho que a argamassa CV30 sem dano apresenta.

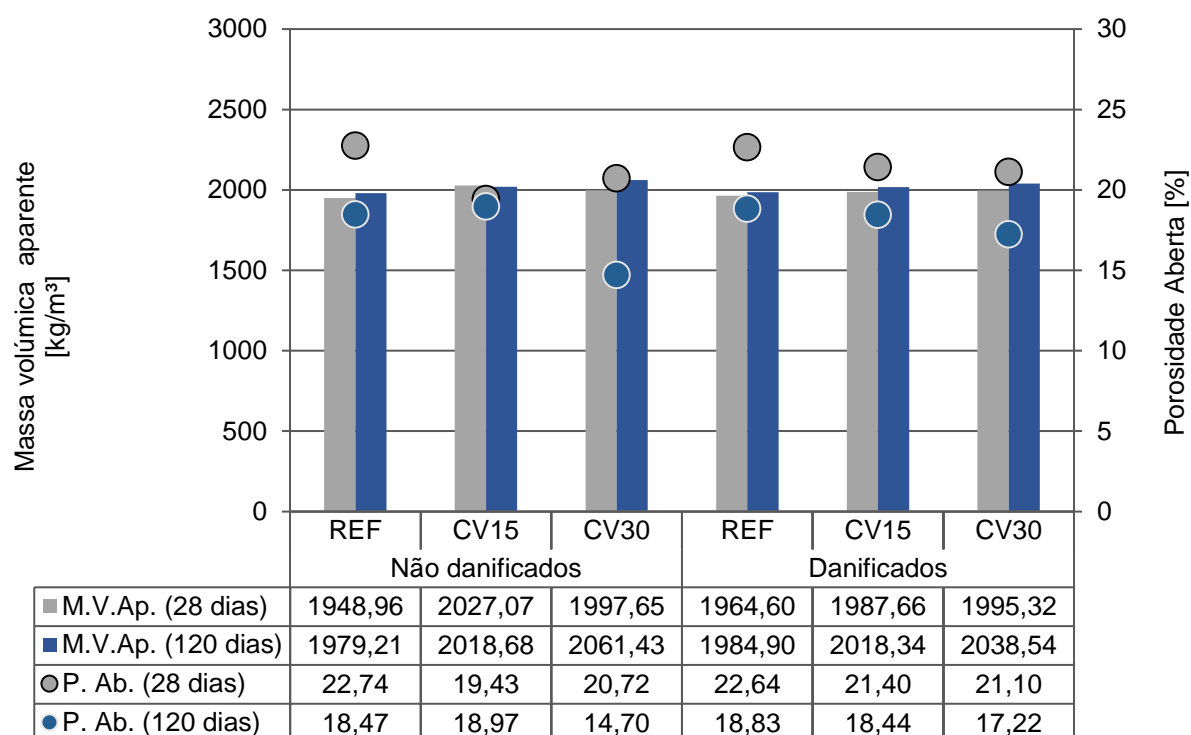


Figura 86 - Comparação da massa volumica aparente com a porosidade aberta

Conforme se observa pela Figura 87, a porosidade aberta manteve valores semelhantes entre provetes sem e com dano. E relativamente às resistências mecânicas, a Figura 87 revela que, mais uma vez, aos 28 dias não se observa uma diminuição das resistências mecânicas nos provetes danificados, conforme era esperado. Assim, mais uma vez se conclui que o dano poderá não ter sido efetivo.

Por outro lado, e apesar de aos 28 dias se ter indícios que o dano provocado não foi efetivo, contrariamente ao que se observou nas argamassas com substituição de cimento por fíler calcário, é possível observar em alguns casos que os provetes com dano superaram a recuperação das suas propriedades aos 120 dias, face aos provetes sem dano. Na argamassa CV15, aos 120 dias, obtiveram-se valores da porosidade aberta inferiores e resistências mecânicas superiores nos provetes danificados face aos provetes não danificados. Por outro lado, na argamassa CV30, apesar dos valores para a porosidade aberta, aos 120 dias, serem superiores nos provetes sem dano face aos provetes com dano, os valores das resistências mecânicas foram, também, superiores nos provetes com dano face aos provetes sem dano.

Ao avaliar a capacidade de autorregeneração em materiais compósitos, com elevados volumes de cinza volante, os autores [104] constataram que a recuperação da resistência à compressão e a diminuição de propriedades associadas à permeabilidade (resistência à penetração de cloretos e absorção de água) podem estar associadas ao preenchimento das fissuras, devido à produção de géis C-S-H derivados da reação pozolânica.

De um modo geral, observou-se pelo gráfico da Figura 87, uma diminuição da porosidade acompanhada pelo aumento das resistências mecânicas, tanto à tração por flexão como à compressão, como esperado. Com a devida ressalva para a argamassa CV15 (ND), as tendências de variação das resistências mecânicas, e da porosidade aberta, parecem manter-se nos provetes sem e com dano, não se podendo concluir que, e com o dano infligido nas argamassas, haja um desenvolvimento destas propriedades no período em análise mais significativo nas argamassas com substituição parcial de cimento por cinza volante.

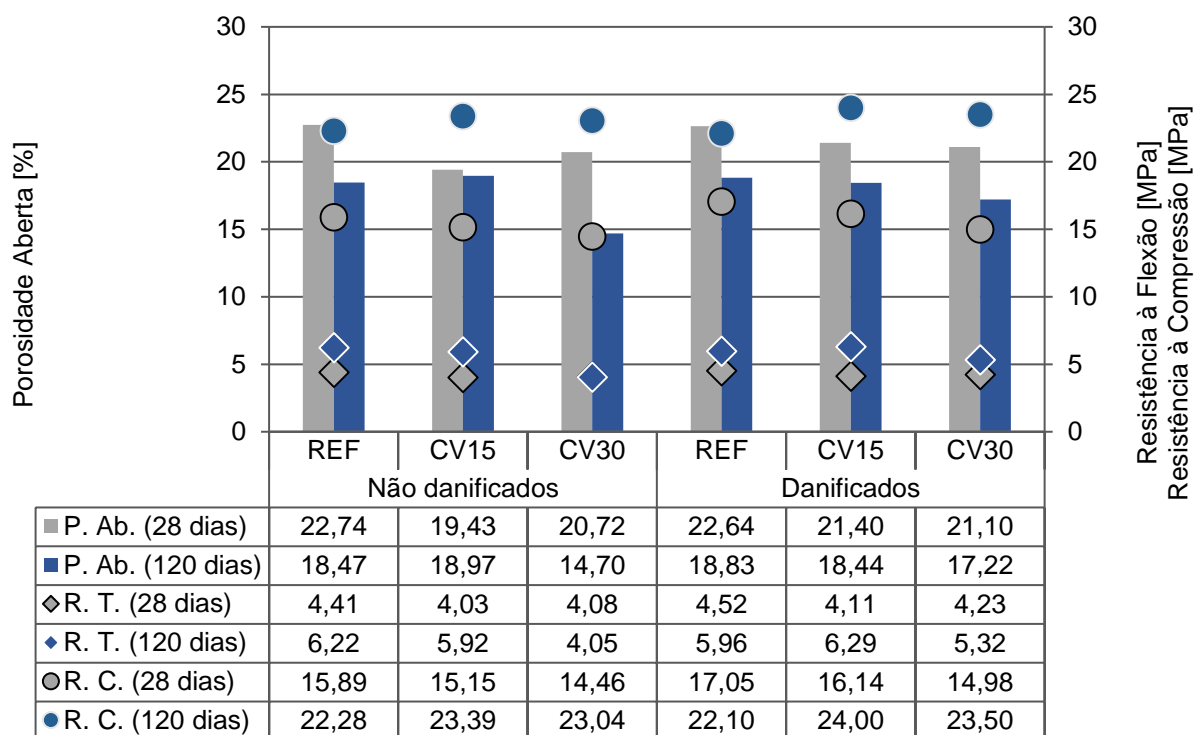


Figura 87 - Comparação da porosidade aberta com a resistência à tração por flexão e à compressão

Através da análise dos gráficos das Figura 86 e Figura 87, ao contrário do que se verificou nas argamassas com substituição de cimento por fíler calcário, aos 28 dias, a massa volúmica aparente não acompanha a mesma tendência que as resistências para as argamassas com substituição de cimento por cinza volante. Nestas, enquanto que os valores da massa volúmica foram superiores nos provetes não danificados, as resistências mecânicas obtidas foram inferiores face aos provetes danificados.

Tal como já foi referido anteriormente, a uma boa resistência mecânica deve, também, estar associado um módulo de elasticidade mais baixo de modo a garantir um melhor comportamento da argamassa face às tensões a que está sujeita, permitindo que a mesma se deforme, evitando assim, a ocorrência de fissuração.

No gráfico da Figura 88, é feita uma análise da evolução do módulo dinâmico de elasticidade face à evolução das resistências mecânicas (à compressão e à tração por flexão) nas

argamassas em análise. Com base nesta análise verifica-se que o aumento do módulo de elasticidade dinâmico acompanhou o aumento das resistências mecânicas, conforme se esperava. A substituição parcial do cimento por cinza volante, aos 28 dias, mostrou diminuir as resistências mecânicas e quanto maior a percentagem de substituição mais agravada se mostrou a situação. Este comportamento pode ser justificado pelo facto de a cinza volante, como material pozolânico, apesar de se estar a aumentar a sua quantidade consequentemente diminui-se a quantidade de cimento. Ao diminuir a quantidade de cimento, reduz-se também o hidróxido de cálcio disponível e assim ocorre uma limitação do desenvolvimento da atividade pozolânica da cinza volante.

No entanto, aos 120 dias, observa-se que os provetes danificados da argamassa CV15 obtiveram valores para as resistências mecânicas superiores aos obtidos nas argamassas REF e CV30, sendo que a argamassa REF foi a que obteve valores mais baixos aos 120 dias nos provetes danificados.

A redução aos 28 dias, das resistências mecânicas, pode estar associada ao facto de a reação pozolânica ser uma reação lenta, o que poderá explicar a tendência inversa que se verifica nas resistências mecânicas aos 120 dias das argamassas com substituição parcial de cimento por cinza volante.

De um modo resumido, apesar de as resistências mecânicas diminuírem, aos 28 dias, com a substituição parcial de cimento por cinza volante, aos 120 dias, a substituição de 15% revela melhores resistências face às restantes argamassas.

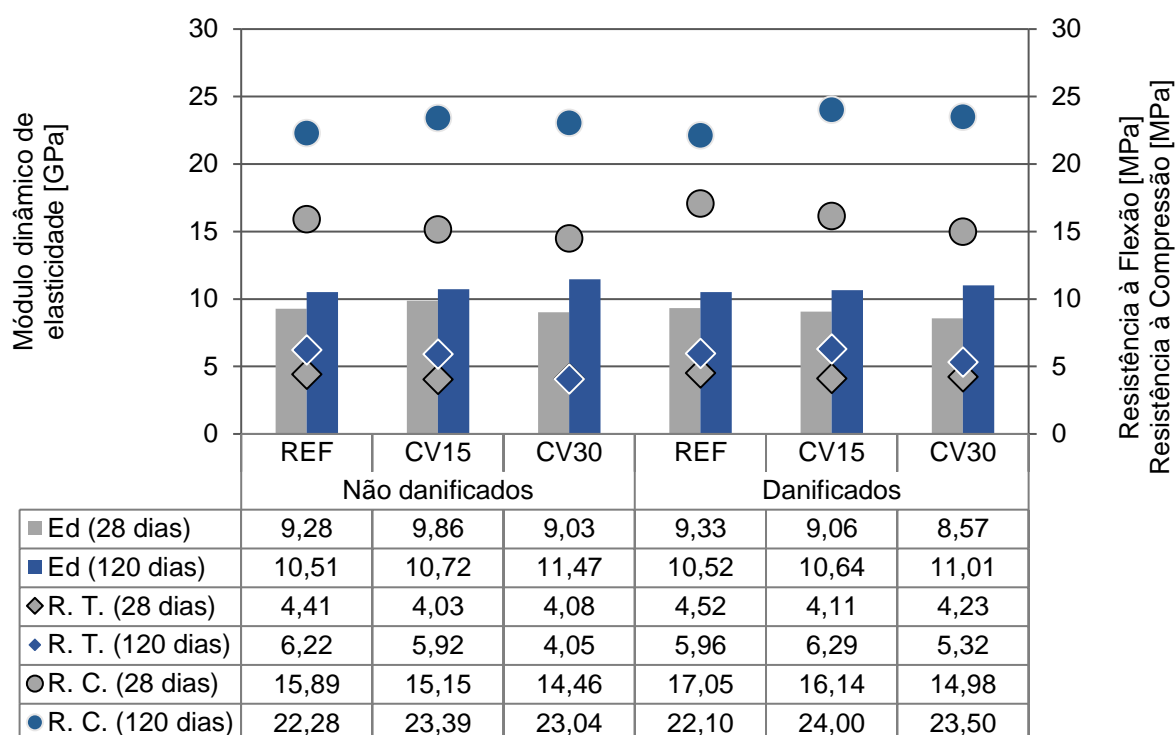


Figura 88 - Comparação do módulo de elasticidade dinâmico com a resistência à tração por flexão e à compressão

Na Figura 89, é feita uma correlação entre a porosidade aberta, a velocidade da absorção capilar (coeficiente de capilaridade) e a absorção total de água por capilaridade (valor assintótico) de cada argamassa em estudo.

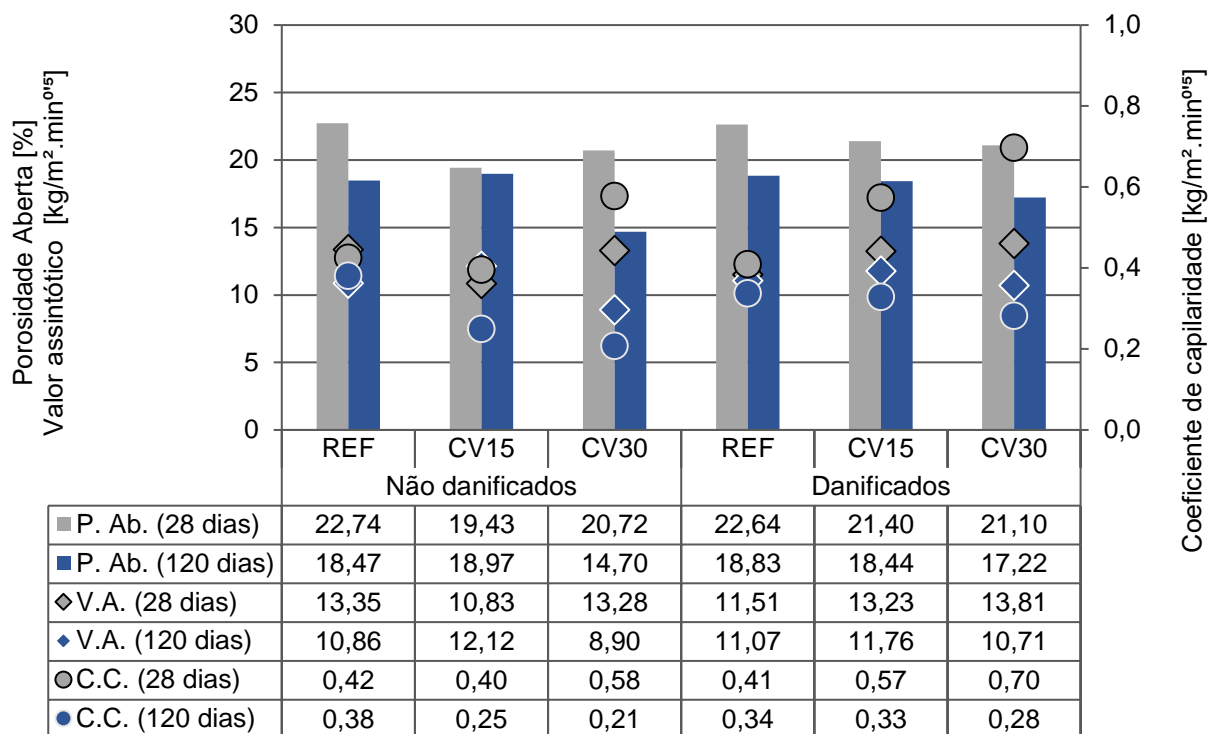


Figura 89 – Comparação entre a porosidade aberta, valor assintótico e coeficiente de capilaridade

O gráfico da Figura 89 permite concluir que a substituição parcial de 30% de cimento por cinza volante permite obter argamassas com menor porosidade aberta que é, também, acompanhada por uma menor capacidade de absorção de água (V.A.). As argamassas CV15, não parecem registrar ganhos significativos com a substituição parcial de cimento por cinza volante, nestes parâmetros. Aliás, aos 120 dias, as argamassas REF apresentam melhores parâmetros relativos à porosidade aberta e valor assintótico, face às argamassas CV15. No que toca à velocidade de absorção capilar (C.C.), é também a argamassa CV30 que apresenta, aos 120 dias, valores mais baixos.

Fazendo agora uma análise aos provetes danificados, verifica-se mais uma vez, que a argamassa CV30 apresenta valores mais baixos de porosidade aberta e V.A. relativamente às restantes argamassas em análise. Relativamente ao C.C., registou-se um ganho, dos 28 para os 120 dias, mais significativo nos provetes CV30 (ND) face aos provetes CV30 (D). No entanto, o oposto ocorreu nas argamassas do tipo CV15, em que se observou um maior ganho, dos 28 para os 120 dias, relativamente ao C.C. nos provetes danificados.

Valores mais baixos da porosidade aberta e ao mesmo tempo do C.C e V.A., conferem às argamassas uma maior proteção contra os mecanismos de degradação.

Com o intuito de tentar avaliar o desenvolvimento da estrutura interna das argamassas em estudo analisa-se, de seguida, a monitorização da velocidade de propagação dos ultrassons, realizada a cada 15 dias.

Na Figura 90, observa-se na primeira medição (M1) que os valores mais baixos, registados de velocidade de ultrassons foram obtidos nos provetes danificados com substituição parcial de 30% de cimento por cinza volante (CV30-D) e, de seguida, nos provetes danificados com substituição parcial de 15% de cimento por cinza volante (CV15-D), cerca de 2,19 e 2,21 km/s respetivamente.

A partir da primeira monitorização, observa-se um aumento gradual da velocidade de propagação dos ultrassons até à última monitorização. Nesta última leitura, observa-se que argamassa REF-ND obteve o valor mais elevado (2,43 km/s) mas, logo a seguir encontra-se a argamassa CV15-D e CV30-D (ambas com 2,42 km/s), sendo esta última a argamassa que regista um aumento mais acentuado, desde a primeira monitorização (M1), da velocidade de propagação dos ultrassons.

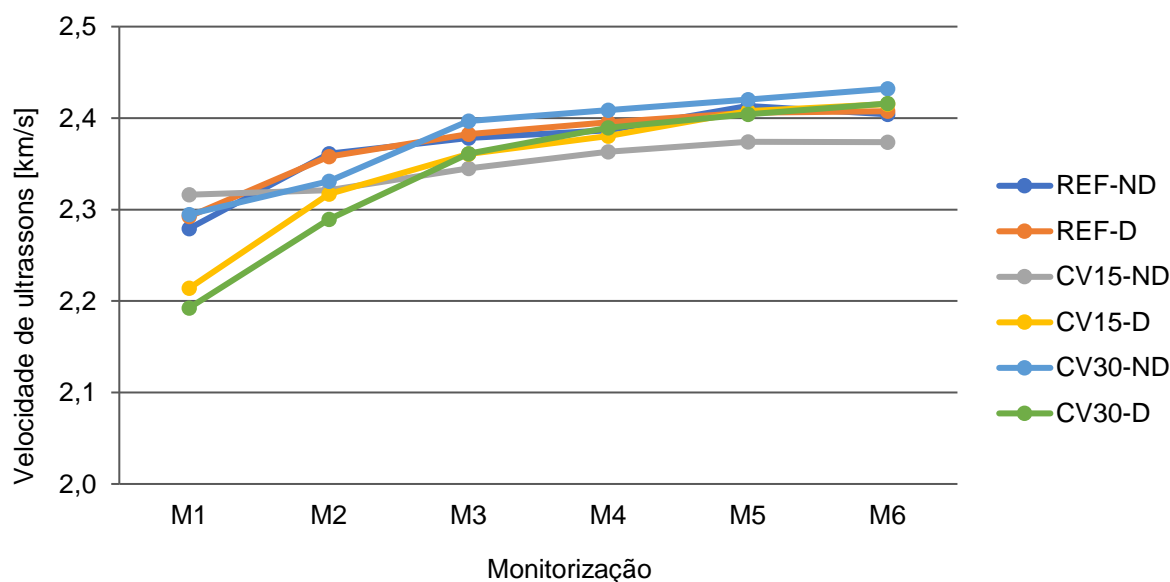


Figura 90 - Análise da monitorização da velocidade de propagação dos ultrassons nas argamassas REF, CV15 e CV30

De um modo geral, observa-se que os provetes danificados da argamassa CV30 recuperam, valores próximos, aos obtidos pelos respetivos provetes não danificados. Por outro lado, os provetes danificados da argamassa CV15, revelam também uma recuperação, mas com valores superiores aos respetivos provetes não danificados.

Em comparação com os resultados da monitorização, obtidos para as argamassas com substituição parcial de cimento por fíler calcário (Figura 84), as argamassas com substituição parcial de cimento por cinza volante obtiveram, de um modo geral, valores mais elevados da velocidade de propagação dos ultrassons.

Ao mesmo tempo, observa-se que as argamassas do tipo CV, obtiveram um aumento gradual mais notório, da velocidade de propagação dos ultrassons, até à última medição (M6). Esta

evolução é mais evidente para os provetes danificados que chegam a obter valores muito próximos dos provetes não danificados, chegando em alguns casos a registar velocidades de ultrassons superiores.

7. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Neste capítulo é feito, inicialmente, um resumo das conclusões obtidas no desenvolvimento da presente dissertação, e por fim, uma sugestão de trabalho futuro que possa contribuir para uma melhor compreensão do tema em estudo.

7.1. CONCLUSÕES GERAIS

A campanha experimental elaborada, no decorrer desta dissertação, destacou vários aspetos importantes associados ao entendimento do fenómeno de autorregeneração em materiais cimentícios, mais precisamente associada à substituição do parcial de ligante por materiais que, podem ou não, conferir propriedades autorregenerantes.

O uso de cinza volante, como uma das adições usadas, teve como intuito observar uma autorregeneração autónoma das fissuras resultado do dano previamente induzido. Por outro lado, o uso de fíler calcário, surge como meio de comparação pelo facto de conferir, ao material cimentício, propriedades benéficas do ponto de vista da durabilidade (menor porosidade, maior compacidade e maior resistência). O objetivo é perceber, em caso de ocorrência de fissura, até que ponto a capacidade de autorregeneração associada ao uso da cinza volante, consegue competir com a adição do fíler de calcário cujo uso possui diversos benefícios. Ao mesmo tempo, existem autores que defendem que o fíler não é quimicamente inerte, como se julga, interagindo com os compostos do cimento melhorando as suas propriedades.

7.1.1. SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO

Conforme mencionado anteriormente, a adição parcial, ou não, de fíler calcário num material cimentício tem associada a diversas vantagens. Uma destas vantagens está associada à própria substituição do ligante pelo fíler, que permite o uso de resíduos da indústria da exploração de pedra e das centrais termoelétricas, apresentando-se assim, uma opção mais sustentável. Por outro lado, o fíler calcário permite também obter uma estrutura mais compacta, menos porosa e assim, mais resistente. Ao mesmo tempo, reage com os compostos do cimento conferindo-lhe resistências elevadas nas primeiras idades.

A substituição parcial de cimento por fíler calcário traduziu-se em argamassas com:

- Menores valores para o espalhamento, sendo mais notável para substituição de 15%;
- Maiores massas volúmicas no estado fresco, conferindo um melhor arranjo do esqueleto sólido das argamassas;
- Menor teor de ar para uma substituição de 15%;
- Diminuição das resistências mecânicas tanto à compressão como à tração por flexão, que se agrava com o aumento da percentagem de substituição, conforme esperado;
- Diminuição da porosidade aberta para uma substituição de 15%;
- Menor absorção total de água aos 120 dias de idade para uma substituição de 15%;
- Maior velocidade de absorção de água por capilaridade aos 120 dias de idade para uma substituição de 15%;
- Diminuição do módulo dinâmico de elasticidade aos 120 dias de idade, sendo o valor mais baixo para a substituição de 30%, ou seja, obtém-se uma argamassa com um melhor comportamento face às tensões, permitindo que se deforme sem fissurar.

Argamassas com substituição parcial de cimento por cinza volante apresentam:

- Menores valores associados ao espalhamento, sendo mais notável para substituição de 15%;
- Maiores massas volúmicas no estado fresco, conferindo um melhor arranjo do esqueleto sólido das argamassas;
- Menor teor de ar para a substituição de 30%;
- Diminuição das resistências mecânicas, tanto à compressão como à tração por flexão, que se agrava conforme o aumento da percentagem de substituição, conforme esperado;
- Diminuição da porosidade aberta para uma substituição de 30%;
- Diminuição da absorção total de água aos 120 dias para uma substituição de 30%, ocorrendo o oposto para uma substituição de 15%;
- Menor velocidade de absorção de água por capilaridade aos 120 dias, sendo esta mais notória para substituições de 30%;
- Diminuição do módulo dinâmico de elasticidade aos 120 dias, para substituições de 30% e o oposto para substituições de 15%.

Em suma, a substituição parcial de cimento por fíler calcário ou cinza volante apresenta diversas vantagens das quais se destacam, para ambos, maiores massas volúmicas no estado fresco, que indiciam um melhor arranjo do esqueleto sólido da argamassa acompanhado por um menor teor de ar na mistura (no estado fresco) para uma substituição de 15% por fíler calcário e uma substituição de 30% por cinza volante.

Relativamente às resistências mecânicas, estas diminuem, aos 28 dias de idade, e este fenómeno agrava-se com o aumento da substituição, o que mostra que o efeito da diminuição do cimento se sobrepõe ao efeito do fíler calcário e à capacidade pozolânica da cinza volante, nestas percentagens de substituição. Não obstante, aos 120 dias, a situação reverte-se para as argamassas com substituição parcial de cimento por cinza volante, nas resistências à compressão. Ou seja, aos 120 dias, estes provetes apresentam uma resistência à compressão superior à dos provetes da argamassa de referência. Este fenómeno pode justificar-se pelo facto de a reação pozolânica ser uma reação lenta e apenas se nota uma sobreposição deste efeito, ao efeito da diminuição de cimento, aos 120 dias. No entanto, o mesmo não se verificou na resistência à tração. Neste caso, as argamassas de referência obtiveram valores de tensão de rotura à tração por flexão superiores.

Ao mesmo tempo, é possível obter argamassas com menor porosidade, menor velocidade de absorção capilar e menor absorção total de água por capilaridade com a substituição parcial de cimento por 15% de fíler calcário ou por 30% de cinza volante.

Em termos de capacidade de resistir a tensões sem deformar, aos 120 dias de idade, dá-se um melhoramento em argamassas com substituição parcial de cimento por 30% de fíler calcário.

Os ensaios das resistências mecânicas, à compressão e à tração por flexão, não permitiram confirmar a existência de dano efetivo. De facto, os provetes sujeitos à aplicação de 60% da sua carga de rotura à compressão registaram, no geral, valores mais elevados nas resistências mecânicas.

A monitorização da velocidade de propagação dos ultrassons, para além de complementar os restantes ensaios, teve como objetivo avaliar irregularidades existentes no interior dos provetes e, ao mesmo tempo, observar um possível desenvolvimento da sua estrutura interna associado ao fenómeno da autorregeneração. E, ainda que esta monitorização permita evidenciar alguma autorregeneração, já que esta obteve ganhos superiores nos provetes danificados face aos provetes não danificados, os resultados obtidos das restantes propriedades não suportam totalmente esta evidência. A existência de dúvida, associada à efetividade do dano, acaba por dificultar a avaliação de uma recuperação no material.

Relembra-se que, a esmagadora maioria dos estudos divulgados à comunidade, trabalhou com argamassas ou betões reforçados de modo a viabilizar o uso do ensaio de resistência à flexão na criação de dano. Na verdade, existem poucos estudos onde se tenha avaliado a capacidade de autorregeneração sem recorrer a qualquer tipo de reforço do material. Na presente dissertação foi criado dano com recurso à aplicação de uma carga à compressão, conforme outros autores, com a ressalva dos provetes serem cúbicos e não prismáticos.

7.2. PROPOSTAS DE DESENVOLVIMENTO FUTURO

No presente subcapítulo são feitas propostas, de desenvolvimento futuro, que contribuam para o estudo do fenómeno da autorregeneração, em argamassas cimentícias, nomeadamente:

- Estudar a melhor forma de induzir dano nos provetes de argamassa de forma a ser possível simular as condições reais de aplicação da mesma. Este estudo poderá passar, por exemplo, pelo uso de uma rede de fibra que possibilite reforçar a argamassa, indo assim, de encontro às técnicas usadas por outros autores que recorrem ao estudo de argamassas ou betões reforçados;
- Foi possível constatar que uma grande parte dos estudos se orienta no sentido de provocar fissuras e ir avaliando, através de diversas técnicas, essencialmente microscópicas, a selagem das mesmas. Seria então importante desenvolver um melhor conhecimento relativamente aos procedimentos de caracterização utilizados neste trabalho, que são mais convencionais, e perceber se conseguem avaliar o efeito de autorregeneração, distinguindo, ao mesmo tempo, este fenómeno do fenómeno de endurecimento associado aos materiais cimentícios;
- Na presente dissertação foi feita uma análise das propriedades das argamassas até aos 120 dias seria, portanto, interessante alargar estes estudos no tempo e perceber o desenvolvimento que se dá após esta idade;
- Por último, seria pertinente avaliar diferentes percentagens de substituição de modo a entender melhor o seu efeito no desenvolvimento das propriedades das argamassas e também na sua potencial capacidade de autorregeneração.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Liberato F Van Mullem T Alonso M *et al.*, *Experimental characterization of the self-healing capacity of cement based materials and its effects on the material performance: A state of the art report by COST Action SARCOS WG2*, vol. 167. Elsevier Ltd, 2018.
- [2] Alvarez J, Sequeira C, e Costa M, *Ensinaamentos a retirar do Passado Histórico das Argamassas*. 2005.
- [3] European Mortar Industry Organisation, «Definitions». [Em linha]. Disponível em: <http://www.euromortar.com/product-range/mortar/>.
- [4] Pereira C e Silva A, *Materiais de Construção I - Documento de apoio*. 2010.
- [5] CEN, *NP EN 998-1: 2010 -Especificações de argamassas para alvenarias - Parte 1: Argamassas para rebocos interiores e exteriores*.
- [6] CEN, *NP EN 998-2: 2010 - Especificações de argamassas para alvenarias - Parte 2: Argamassas para alvenarias*. 2010.
- [7] «APFAC». [Em linha]. Disponível em: <https://www.apfac.pt/>.
- [8] INE e LNEC, *O Parque Habitacional e a sua Reabilitação - Análise e Evolução 2001-2011*. 2013.
- [9] Veiga M, *Comportamento de argamassas de revestimentos de paredes: Contribuição para o estudo da sua resistência à fendilhação*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1998.
- [10] Martins A, *Estudo da influência da dosagem de cimento no desempenho de argamassas de reboco. Dissertação de Mestrado, Universidade Técnica de Lisboa - IST*. 2008.
- [11] Nakakura E e Cincotto M, *Análise dos requisitos de classificação de argamassas de assentamento e revestimento. Escola Politécnica da USP Departamento*. 2004.
- [12] Ecorbis, *Registo fotográfico de anomalias*. 2018.
- [13] Chaves A, *Patologia e reabilitação de revestimentos de fachadas. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia da Universidade do Minho*. 2009.
- [14] Instituto Nacional da Habitação e LNEC, *Guia Técnico de Reabilitação Habitacional*. 2006.
- [15] Leal A, *Argamassas tradicionais de revestimentos de paredes: Fendilhação e sua reparação. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa*. 2009.

- [16] G. M e Margarido F, Eds., *Ciência e Engenharia de Materiais de Construção I. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa*, 1ª. IST Press, 2012.
- [17] A. Gomes, A. P. F. Pinto, e J. B. Pinto, *Cimento Portland e Adições. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa*. 2013.
- [18] Rodrigues M, *Argamassas de revestimento para alvenarias antigas - Contribuição para o estudo da influência dos ligantes. Tese de Doutoramento, Universidade Nova de Lisboa - Departamento de Engenharia Civil*. 2004.
- [19] Coutinho A, *Fabrico e propriedades do betão, volume I. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2ª Edição, Lisboa*. LNEC, 1988.
- [20] Vieira J, *Interacção Cimento-Superplastificante: Avaliação da estabilidade do comportamento. Dissertação de Mestrado, Universidade Técnica de Lisboa- IST*. 2010.
- [21] Réfega G, *Avaliação da durabilidade de slurry-infiltrated mat concrete de baixo custo comercial. Dissertação de Mestrado, Escola Superior de Tecnologia do Barreiro - Instituto Politécnico de Setúbal*. 2017.
- [22] Griesser A, *Cement-superplasticizer interactions at ambient temperatures. Doctoral Thesis, SWiss Federal Institute of Technology Zurich*. 2002.
- [23] Scrivener K e Nonat A, *Hydration of cementitious materials, present and future*, vol. 41, n. 7. Elsevier Ltd, 2011.
- [24] Catarino J, *Avaliação da Influência do Cimento na interação Cimento-Superplastificante. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa - Departamento de Engenharia Química*. 2012.
- [25] «Scientific Principles of Concrete», *Science of concrete*, 2014. [Em linha]. Disponível em: <https://www.concretedecor.net/decorativeconcretearticles/online-exclusives/scientific-principles/>.
- [26] Jolicoeur C e Simard M, *Chemical Admixture-Cement Interactions: Phenomenology and Physico-Chemical Concepts*, vol. 20, n. 2–3. 1998.
- [27] Faria É, *Predição da exotermia da reação de hidratação do concreto através de modelo termo-químico e modelo de dados. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro -Departamento de Engenharia Civil*. 2004.
- [28] Bishop M, *Cement hydration inhibition and crosslinking in the guar-borate system. Doctoral Thesis - Rice University (Houston, Texas)*. 2001.
- [29] Plang-ngern S e Wannaphahoun W, «Influence of Polycarboxylate-Base Superplasticizers on Physico-Chemistry of Cement Paste for Use in Self-Consolidating Concrete (Scc) - 3rd ACF International Conference-ACF/VCA 2008», pp. 607–618, 2008.
- [30] Mehta PK, *Natural pozzolans: Supplementary cementig materials for concrete*. 1987.
- [31] CEN, *NP EN 206-1: 2007 - Betão - Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade desempenho, produção e conformidade*.

- [32] CEN, *NP EN 197-1: 2012 - Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes*.
- [33] Botas S, *Avaliação do comportamento de argamassas em climas frios. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade Nova de Lisboa*. 2009.
- [34] Leal S, *Caraterização petrográfica de agregados sedimentares e metamórficos para betão. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto - Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território*. 2014.
- [35] Leal M, *Argamassas de revestimento com comportamento térmico melhorado. Dissertação de Mestrado, Escola Superior de Tecnologia do Barreiro - Instituto Politécnico de Setúbal*. 2012.
- [36] Martins A, *A influência das condições de cura em argamassas de cais aéreas com e sem adição de metacaulino. Dissertação de Mestrado, Escola Superior de Tecnologia do Barreiro - Instituto Politécnico de Setúbal*. 2010.
- [37] D. H. Perelles, M. F. . Medeiros, e M. R. Garcez, *Hidratação e propriedades de cimentos compostos (com três adições) com filer calcário e escória*. Alconpat, vol. 3. 2013.
- [38] Georgescu M e Saca N, *Properties of blended cements with limestone filler and fly ash content. UPB Scientific Bulletin, Series B: Chemistry and Materials Science*, vol. 71, n. 3. 2009.
- [39] CEN, *NP EN 450-1: 2012 - Cinzas volantes para betão - Parte 1: Definição, especificações e critérios de conformidade*.
- [40] Machado S, *Influência de agregados provenientes de RCD e cinzas volantes não-conformes em argamassas cimento. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade Nova de Lisboa*. 2014.
- [41] Ahmaruzzaman M, *A review on the utilization of fly ash. Progress in Energy and Combustion Science* 36, 327–363 (2010).
- [42] Christy C e Tensing D, *Effect of class-F fly ash as partial replacement with cement and fine aggregate in mortar. Indian Journal of Engineering & Materials Sciences* Vol 17, p.140-144 (2010).
- [43] Paulo R, *Caracterização de Argamassas Industriais. Dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro - Departamento de Engenharia Cerâmica e do Vidro*. 2006.
- [44] Patil S, Nawle C, e Kulkarni S, *Industrial Applications of Fly ash: A Review. International Journal of Science, Engineering and Technology Research (IJSETR) Volume 2, Issue 9, (2013)*.
- [45] B. Barra, L. Momm, Y. Guerrero, e L. Bernucci, «Characterization of granite and limestone powders for use as fillers in bituminous mastics dosage», *An. Acad. Bras. Cienc.*, vol. 86, n. 2, pp. 995–1002, 2014.
- [46] Coutinho J, *Materiais de Construção 2: 1ª Parte – Ligantes e Caldas. Faculdade de Engenharia do Porto*. 2006.

- [47] Coutinho J, *Ataque por sulfatos - Faculdade de Engenharia do Porto*. FEUP, 2001.
- [48] G. Di Luzio, L. Ferrara, e V. Krelani, «Numerical modeling of mechanical regain due to self-healing in cement based composites», *Cem. Concr. Compos.*, vol. 86, pp. 190–205, 2018.
- [49] Lubelli B, Nijland T, e Hees R, *Self-healing of lime based mortars: Microscopy observations on case studies*. *Heron* vol.56, vol. 56, n. 1–2. 2011.
- [50] Tittleboom K e de Belie N, *Self-healing in cementitious materials-a review*, vol. 6, n. 6. 2013.
- [51] de Rooij M, Van Tittelboom K, de Belie N, e Schlangen E, *Self-healing phenomena in cement-based materials - STAR 221-SHC*. Springer, 2013.
- [52] Jonkers H, *Bacteria-based Self-healing Concrete*, vol. 56, n. 4. 2011.
- [53] Wiktor V e Jonkers H, *Field performance of bacteria-based repair system: Pilot study in a parking garage*, vol. 2. Elsevier Ltd., 2015.
- [54] «Basilisk - Self healing concrete». [Em linha]. Disponível em: [internal-pdf://157.131.140.71/Self Healing Concrete_Rishabh.pdf](http://internal-pdf://157.131.140.71/Self%20Healing%20Concrete_Rishabh.pdf).
- [55] Igarashi S, Kunieda M, e Nishiwaki T, *Research Activity of JCI technical committee TC-075B report: Autogenous healing in cementitious materials*. 2009.
- [56] Mihashi H e Nishiwaki T, *Development of Engineered Self-Healing and Self-Repairing Concrete-State-of-the-Art Report*. *Journal of Advanced Concrete Technology*, vol. 10, n. 5. 2012.
- [57] de Belie N, Gruyaert E, e Tabbaa A et al., *A Review of Self-Healing Concrete for Damage Management of Structures*. *Advanced Materials Interfaces*. 2018.
- [58] Neville A, *Autogenous healing - A concrete miracle?*. *Concrete International*, vol. 24. 2002.
- [59] Aldea C, Song W, Popovics J, e Shah S, *Extent of Healing of Cracked Normal Strength Concrete*. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2000.
- [60] Edvardsen C, *Water permeability and autogenous healing of cracks in concrete*. *ACI Materials Journal*. 1999.
- [61] Nishiwaki T, Koda M, e Yamada M et al., *Experimental Study on Self-Healing Capability of FRCC Using Different Types of Synthetic Fibers*. *Journal of Advanced Concrete Technology*, vol. 10, n. 6. 2012.
- [62] Schlangen E e Heide N, *Self-healing of early age cracks in concrete*. *First International Conference on Self Healing Materials*, n. January 2006.
- [63] Tang W, Kardani O, e Cui H, *Robust evaluation of self-healing efficiency in cementitious materials - A review*. *Construction and Building Materials*, vol. 81. Elsevier Ltd, 2015.
- [64] Martins M, «Uso de bactérias na reparação de fissuras no betão. Dissertação de

- Mestrado, Escola de Ciências e Tecnologia da Universidade de Évora - Departamento de Engenharia Rural», 2015.
- [65] Ghosh P, Mandal S, e Chattopadhyay B. et al., *Use of microorganism to improve the strength of cement mortar. Cement and Concrete Research.* 2005.
- [66] Nugroho A, Satyarno I, e Subyakto S, *Bacteria as Self-Healing Agent in Mortar Cracks. Journal of Engineering and Technological Sciences*, vol. 47, n. 3. 2015.
- [67] Krelani V e Ferrara L, *Self-healing capacity of concrete with crystalline additives: natural vs. accelerated exposure conditions*, n. September 2015. 2013.
- [68] Nishiwaki T, Mihashi H, e Jang B et al., *Development of Self-Healing System for Concrete with Selective Heating around Crack. Journal of Advanced Concrete Technology*, vol. 4, n. 2. 2006.
- [69] Na S, Hama Y, e Taniguchi M et al., *Experimental Investigation on Reaction Rate and Self-healing Ability in Fly Ash Blended Cement Mixtures. Journal os Advanced Concrete Technology*, vol. 10, n. 7. 2012.
- [70] Mukherjee S, Mandal S, e Mohanta S et al., *Comparative Study on Self Healing of Fly Ash and Conventional Cement Mortar. Current Advances in Civil Engineering (CACE) Comparative*, vol. 2, n. April 2014. 2016.
- [71] Jaroenratanapirom D e Sahamitmongkol R, *Self-crack closing ability of mortar with different additives. Journal of Metals, Materials and Minerals*, vol. 21, n. 1. 2011.
- [72] de Weerd K, *SINTEF Report: Ternary blended cements with fly ash and limestone. Part II: limestone powder.* 2007.
- [73] Válek J, Hughes J, e Groot C, *Historic mortars: Characterisation, assessment and repair. A state-of-the-art summary. RILEM Bookseries.* 2013.
- [74] J. Su, J. yao Ye, Z. Fang, e M. hua Zhao, «Size effect on cubic and prismatic compressive strength of cement paste», *J. Cent. South Univ.*, vol. 22, n. 10, pp. 4090–4096, 2015.
- [75] Carminho F, *Resistência do betão à compressão em cubos vs cilindros. Dissertação de mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova.* 2012.
- [76] Li M, Hao H, e Shi Y et al., *Specimen shape and size effects on the concrete compressive strength under static and dynamic tests. Construction and Building Materials*, vol. 161. Elsevier Ltd, 2018.
- [77] Yi S, Yang E, e Choi J, *Effect of specimen sizes, specimen shapes, and placement directions on compressive strength of concrete. Nuclear Engineering and Design*, vol. 236, n. 2. 2006.
- [78] Williams S, «Toward the Development of Robust Self-Healing Concrete Using Vegetative Microorganisms. Master's Degree Thesis, University of Texas (Austin)», p. 182, 2015.
- [79] Menezes V, Ferronato D, e Santos E et al., *Estudo do comportamento da porosidade*

de pasta de cimento por ultrassom. 60º Congresso Brasileiro de Cerâmica. 2016.

- [80] CEN, *EN 1015-2/A1 (1998/2006)*.
- [81] CEN, *NP EN 196-1:2005*.
- [82] SECIL, *Ficha técnica do cimento Portland (CEMII/B-L 32,5N)*. 2004.
- [83] Dias N, *Betão reforçado com lâ de aço – BRLA Produção e caracterização. Dissertação de Mestrado, Escola Superior de Tecnologia do Barreiro - Instituto Politécnico de Setúbal*. 2014.
- [84] CEN, *NP EN 933-1:2000*. .
- [85] «Areipor». [Em linha]. Disponível em: <http://www.areipor.pt/pt/produtos.html>. 12/5/2018
- [86] CEN, *EN 1015-3:1999*.
- [87] CEN, *EN 1015-6:1998*.
- [88] CEN, *EN 1015-7:1998*.
- [89] CEN, *EN 1015-11:1999*.
- [90] CEN, *EN 12504-4:1998*.
- [91] CEN, *EN 1015-12:2000*.
- [92] CEN, *NP EN 1936:2008*.
- [93] LNEC, *E 394 (1993)*.
- [94] CEN, *EN 1015-18:2002*.
- [95] CEN, *EN 1254-4:1998*.
- [96] Gonçalves A, *Estudo da influência dos factores de aplicação no desempenho de argamassas de revestimento recorrendo a técnicas de ensaio in-situ. Dissertação de Mestrado, Universidade Técnica de Lisboa - IST*. 2010.
- [97] Branco T, *Evolução e comparação das características de argamassas de cal aérea com adição de metacaulino. Dissertação de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa*. 2013.
- [98] «Engineering statistics», 2014. [Em linha]. Disponível em: <https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/prc/section1/prc16.htm>.
- [99] Mergulhão D, *Argamassas de cal aérea e metacaulino: A influência do traço e da cura. Dissertação de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa*. 2014.
- [100] Wang X, *Analysis of hydration and strength optimization of cement-fly ash-limestone ternary blended concrete. Construction and Building Materials*, vol. 166. Elsevier Ltd, 2018.

- [101] Rodrigues P, Henriques F, e Rato V, *Argamassas Correntes: Influência do Tipo de Ligante e do Agregado*. 2º Congresso Nacional de Argamassas De Construção, Lisboa, Portugal. 2007.
- [102] Barreto M, *Avaliação da resistência de aderência à tração de argamassas de cimento portland novas e envelhecidas - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais*, n. 1. 2014.
- [103] Rodrigues P, *Compatibilidade entre as paredes e respectivos revestimentos*. Seminário de arquitectura de Terra em Portugal. 2004.
- [104] Sahmaran M, Keskin S, e Ozerkan G et al., *Self-healing of mechanically-loaded self consolidating concretes with high volumes of fly ash*. *Cement and Concrete Composites*, vol. 30, n. 10. 2008.